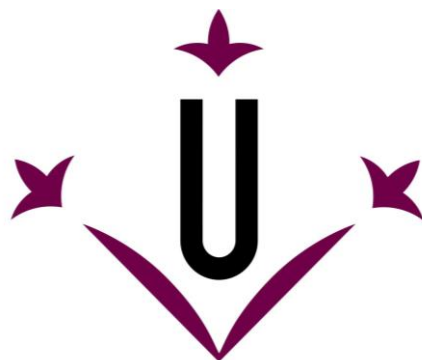


**UNIVERSITAT DE LLEIDA**

**Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Agrària**



**TRABAJO FINAL GRADO INGENIERÍA AGRARIA Y  
ALIMENTARIA**

*DISEÑO Y MODELIZACIÓN DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN  
DE SUELOS Y ANÁLISIS DE SUS EFECTOS EN LAS PÉRDIDAS DE  
SUELO Y NUTRIENTES EN UNA CUENCA VITÍCOLA DEL ANOIA.*

**Autora:** Carolina Benito Planas

**Tutora:** Dra. M<sup>a</sup> Concepción Ramos Martín

**Lleida, 13 de Mayo de 2018**



## RESUM

En les últimes dècades, les noves vinyes han estat adaptades per la mecanització del treball. Això ha facilitat la transitabilitat de maquinària, però la majoria de mesures de conservació de sòls i aigua, presents en plantacions antigues, s'han eliminat.

En aquest treball s'analitza l'efecte de l'aplicació de terrasses de drenatge i franges de vegetació en una petita conca on el principal ús és la vinya. La conca es troba al municipi Els Hostalets de Pierola, província de Barcelona (NE Espanya). Les pèrdues de sòl i nutrients van ser simulades utilitzant SWAT durant un període d'anys que presenten diferents quantitats de pluja i característiques. El model va ser calibrat i validat a partir de dades recollides sobre terreny durant el període maig 2010 - maig 2012. Es van comparar les pèrdues de sòl i nutrients (N i P) en la conca, amb i sense mesures de conservació de sòls.

La precipitació anual durant els anys analitzats oscil·la entre 329,8 i 785 mm, l'escolament representa el 4,1 i el 21% de la precipitació total. Les pèrdues anuals de sòl variarien entre <1 t/ha l'any més sec i 13,9 t/ha el més humit. La mitjana de les pèrdues de nutrients anuals van ser aproximadament de 2,7 kg NO<sub>3</sub>/ha i 17 kg Norg/ha i 0,5 kg P\_sol/ha i 5,5 kg P\_Org/ha. Aquests resultats impliquen no només la font de contaminació no-puntual, sinó pèrdues econòmiques pels viticultors. L'aplicació de terrasses de drenatge va produir una reducció del 20% de les pèrdues de sòl i l'efecte addicional de les franges de vegetació redueix un 50% les pèrdues de sòl. Les pèrdues de nutrients també es van reduir significativament tal i com mostren els resultats.



## RESUMEN

En las últimas décadas, los nuevos viñedos plantados han sido adaptados para la mecanización del trabajo. Esto ha facilitado el tránsito de maquinaria, pero la mayoría de medidas de conservación de suelos y agua, presentes en plantaciones antiguas, han sido eliminadas.

En este trabajo se analiza el efecto de la aplicación de terrazas de drenaje y franjas de vegetación en una pequeña cuenca, cuyo principal uso es el viñedo. La cuenca se encuentra en el municipio de Els Hostalets de Pierola, provincia de Barcelona (NE España). Las pérdidas de suelo y nutrientes fueron simuladas utilizando SWAT durante un periodo de años que presentan diferentes cantidades de lluvia y características. El modelo fue calibrado y validado a partir de datos recogidos sobre terreno durante el período mayo 2010- mayo 2012. Se compararon las pérdidas de suelo y agua en la cuenca, con y sin medidas.

La precipitación anual durante los años analizados osciló entre 329,8 y 785 mm y las tasas de escorrentía representaron entre el 4,1 y el 21% de la precipitación total. Las pérdidas anuales de suelo variaron entre <1 t/ha en el año más seco y 13,9 t/ha el más húmedo. El promedio de las pérdidas de nutrientes anuales fueron aproximadamente de 2,7 kg NO<sub>3</sub>/ha y 17 kg Norg/ha y 0,5 kg P<sub>sol</sub>/ha y 5,5 kg P<sub>Org</sub>/ha.

Estos resultados implican no sólo una fuente de contaminación no-puntual, sino pérdidas económicas para los viticultores. La aplicación de terrazas de drenaje produjo una reducción del 20% de las pérdidas de suelo y el efecto adicional de las franjas de vegetación puede reducir las pérdidas de suelo hasta en un 50%. Las pérdidas de nutrientes también se redujeron significativamente tal y como reflejan los resultados.

## **ABSTRACT**

In recent past decades, new vineyards have been planted and adapted for labour mechanization. This has facilitated the trafficability of machinery but most soil and water conservation measures, usually existing in old plantations, have been eliminated.

In this work, the effect of implementing drainage terraces and filter strips in a small basin, whose main land use is vines, is analysed. The catchment is located in the municipality of Els Hostalets de Pierola, Barcelona province (NE Spain). Soil and nutrient losses were simulated using SWAT for years with different rainfall amount and characteristics. The model was calibrated and validated using data collected in the field during the period from May 2010 to May 2012. Soil and water losses in the basin with and without soil conservation measures were compared.

The annual rainfall during the analysed years ranged between 329.8 and 785 mm, Runoff rates represented between 4.1 and 21% of total precipitation. Annual soil losses ranged between <1 t/ha in the driest year and 13.9 t/ha, in the wettest. Average annual nutrient losses were about 2.7 kg NO<sub>3</sub>/ha and about 17 kg N<sub>org</sub>/ha, and 0.5 kg P<sub>sol</sub>/ha and 5.5 kg P<sub>Org</sub>/ha.

These results imply not only a non-point source pollution but economic losses for wine producers. The implementation of drainage terraces produced a reduction of soil losses up to 20%, and the additional effect of the implementation of filter strips reduced soil losses up to 50%. Nutrient losses were also reduced significantly as it is shown at the final results.



- **ÍNDICE DEL TRABAJO**
- 1. **INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES**.....7
- 2. **OBJETIVO**.....9
- 3. **ÁREA DE ESTUDIO**.....10
  - 3.1. **LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO**.....10
  - 3.2. **CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS**.....12
  - 3.3. **CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS Y USOS DEL SUELO**.....13
- 4. **MATERIALES Y MÉTODOS**.....14
  - 4.1. **MODELO SWAT**.....14
  - 4.2. **PARÁMETROS DE ENTRADA AL MODELO**.....16
  - 4.3. **CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO**.....17
    - 4.3.1. **USOS DEL SUELO**.....17
    - 4.3.2. **TIPOS DE PENDIENTE**.....17
    - 4.3.3. **DEFINICIÓN DE SUBCUENCAS EN LA ZONA DE ESTUDIO**.....21
  - 4.4. **CALIBRACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO**.....35
- 5. **MEDIDAS DE CONSERVACIÓN, ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y DISEÑO**.....39
  - 5.1. **MEDIDAS DE CONSERVACIÓN**.....39
  - 5.2. **ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**.....41
    - 5.2.1. **MÉTODO MECÁNICO: Terrazas de desagüe “Broad Terraces”** .....42
    - 5.2.2. **MEDIDAS AGRONÓMICAS**.....44
  - 5.3. **DISEÑO**.....44
    - 5.3.1. **DISEÑO DE LAS TERRAZAS DE DESAGÜE**.....44
    - 5.3.2. **DISEÑO DE LAS FRANJAS DE VEGETACIÓN**.....60
- 6. **APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS PROPUESTAS MEDIANTE EL MODELO SWAT**.....61



<b>7. ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE SUELO Y NUTRIENTES ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN.....</b>	<b>71</b>
<b>7.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DE LA ZONA DURANTE EL PERÍODO ANALIZADO.....</b>	<b>71</b>
<b>7.2. PREDICCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE SUELO ACTUALES.....</b>	<b>79</b>
<b>7.3. PREDICCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE SUELO DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN.....</b>	<b>81</b>
<b>7.4. PREDICCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE NUTRIENTES ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN.....</b>	<b>90</b>
<b>8. VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA IMPLANTACIÓN Y MANTENIMIENTO DE LAS MEDIDAS DE CONSERVACIÓN.....</b>	<b>99</b>
<b>9. PROPUESTA FINAL.....</b>	<b>109</b>
<b>10. ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>114</b>
<b>11. ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>115</b>
<b>12. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>118</b>

## 1. INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

La erosión del suelo es un problema muy extendido en todo el mundo y, en particular, en las zonas de influencia mediterránea y climas semiáridos. Este proceso conlleva la progresiva pérdida de la capacidad de regeneración de los suelos y la vegetación. En las zonas mediterráneas, factores como el clima, la topografía, las características de los suelos, el cambio de los usos del suelo y la aplicación de prácticas agrícolas intensivas han convertido la erosión del suelo en la principal causa de degradación de la tierra (Cerdà 2008).

La región Anoia-Penedés (Cataluña) es un claro ejemplo de esta problemática. En esta región, la coincidencia del cultivo extensivo de la viña, las frecuentes lluvias de alta intensidad, los suelos con elevada susceptibilidad a la erosión (margas terciarias y materiales no consolidados), el uso del suelo y cambios en su manejo con el abandono de las medidas tradicionales de conservación de suelos, han acelerado los procesos de erosión (Ramos y Martínez-Casasnovas 2006).

En dicha zona, durante los últimos años se han realizado diferentes estudios que han permitido conocer los problemas de erosión en parcelas de viña y su influencia en las pérdidas de suelo y nutrientes. Entre ellos, cabe destacar los estudios sobre las alteraciones del suelo debido a la erosión por el laboreo y las nivelaciones en viñedos (Martínez-Casasnovas y Ramos 2009); los efectos de la reorganización del suelo en nuevas plantaciones de viñedos sobre las tasas de escorrentia y erosión (Ramos y Martínez-Casasnovas 2010) y el impacto de las precipitaciones anuales extremas en las pérdidas de suelo y nutrientes en viñedos (Ramos y Martínez-Casasnovas 2009).

En este trabajo se quiere dar un paso más, extendiendo el análisis a escala de cuenca y proponiendo alternativas de medidas de conservación que puedan ser aplicadas de manera directa a corto plazo, a fin de reducir los procesos erosivos y de pérdida de nutrientes que actualmente están ocurriendo en la zona.

Para poder llevar a cabo un análisis de alternativas de medidas de conservación se hace necesaria la utilización de algún modelo de simulación que considere los factores de influencia de la producción de sedimentos en suelos agrícolas. De estos factores, las propiedades de los suelos y la topografía pueden ser considerados constantes a corto plazo. No así, la cobertura del suelo y las características climáticas, que son también variables importantes en la ocurrencia y el control de la erosión respectivamente las variables más influyentes en los procesos de erosión (Cerdà 1998, Marques et al. 2007). La cubierta vegetal es el principal

agente de control frente a la erosión del suelo debido a la influencia positiva en la calidad del suelo respecto a su contribución en materia orgánica (Cerdà 1998).

En las regiones de elevado interés agrícola, la evaluación de la erosión de los suelos es muy importante a fin de evaluar los sedimentos para determinar las contribuciones relativas de las potenciales fuentes de sedimentos e identificar las áreas más propensas a sufrir erosión. La localización y caracterización de dichas áreas es de gran ayuda para identificar las potenciales fuentes de erosión y así mejorar el conocimiento de las zonas afectadas y el desarrollo de programas de medidas de control para disminuir la erosión del suelo (Valentin et al. 2005).

No existe un procedimiento estándar para la evaluación de los procesos de erosión. La evaluación de la erosión del suelo depende de la escala espacial y varía según sea el objetivo del estudio (Warren 2002; Nadal-Romero y Regués 2010). En ambientes mediterráneos semiáridos se han llevado a cabo numerosos estudios para cuantificar la escorrentía y la producción de sedimentos con la finalidad de analizar la relación entre la cubierta vegetal del suelo y la erosión. Tradicionalmente, dichos estudios se han llevado a cabo en pequeñas cuencas, centrándose en mediciones directamente en campo (Bochet et al. 1998; Dunjó et al. 2004). En cambio, para las grandes áreas de estudio o a nivel regional, deben aplicarse otras aproximaciones que incluyan el uso de datos del medio a escala espacial más o menos detallada (Alatorre y Beguería 2009) y el uso de modelos de predicción.

En la predicción de la erosión se ha utilizado una gran diversidad de modelos. Entre ellos se pueden encontrar modelos espacialmente distribuidos, con un enfoque empírico (WATEM-SEDEM,- Haregeweyn et al. 2011) o físico (PESERA- Kirbby et al. 2008; SWAT-Nearing et al. 2005 ); modelos no espacialmente distribuidos entre los que se incluyen modelos de regresión entre ellos el modelo (R-USLE -Renard et al. 1997) , o el modelo (PSIAC- de Vente et al. 2005); modelos conceptuales (AGNPS -Young et al. 1989), u otros modelos con base física EUROSEM (Morgan et al. 1998); WEPP (Flanagan et al. 2001) o CREAMS (Knisel 1980). Dichos modelos se han aplicado a diferentes escalas y bajo diferentes condiciones ambientales.

En los últimos años, en la zona del Anoia-Penedés, el Departamento de Medio Ambiente y Ciencias del Suelo de la Universidad de Lleida, ha trabajado en la calibración del modelo Soil and Water Assessment Tool (Arnold et al. 2008) en zonas de viña del entorno mediterráneo. Este modelo, que tiene en cuenta las características de los suelos y del clima, así como los usos de la tierra y sus prácticas de manejo, se ha mostrado como una herramienta útil para estimar las pérdidas de suelo a escala de cuenca (Bathurst et al. 2006; Martínez-Carreras et al. 2007;





Mueller et al. 2009). También, para evaluar los impactos de las medidas de conservación a diferentes escalas espacial y temporal (Chiang et al. 2010; Gassman et al. 2007).

Así, en el presente trabajo se toman como base de partida los resultados de una simulación de pérdidas de suelo utilizando SWAT para analizar diferentes soluciones o propuestas de control de la erosión. Éstas, se desarrollarán desde distintos puntos de vista, respetando al máximo los cultivos o usos del suelo existentes. En este trabajo, se toman como base de partida los resultados de una simulación utilizando SWAT (Arnold et al. 2008), tal y como se ha comentado es un modelo que tiene en cuenta las variables de características de suelos, clima y usos y prácticas de manejo de la tierra. Se procede a plantear los diferentes escenarios de simulaciones y las diferentes soluciones o propuestas que se desarrollarán están contempladas desde distintos puntos de vista, respetando al máximo los cultivos y usos del suelo existentes y observando las reducciones de pérdidas de suelo y de nutrientes que se realizaría en cada actuación simulada.

## **2. OBJETIVO**

El objetivo de este Trabajo Final de Grado, en adelante TFG, es analizar la eficacia de diferentes medidas de conservación de suelos para reducir las pérdidas de suelo bajo diferentes condiciones climáticas en una cuenca de 46,4 ha, en la que el viñedo es el uso mayoritario. El estudio se lleva a cabo mediante simulación con SWAT (versión del modelo Arc SWAT 2009.93.5.) para el período 2000-2011. Como medidas de conservación se propone la implementación de Terrazas de drenaje “Broad Terraces” y Franjas de vegetación “Filter Strips”. Se analiza su efecto por separado y la combinación de ambas medidas a fin de valorar su efecto en las pérdidas de suelo y de nutrientes en comparación al estado actual de la cuenca objeto del estudio (sin ninguna medida de conservación).

El trabajo incluye el diseño de las medidas adaptándolas a las condiciones de la cuenca, su inclusión en el modelo, el análisis de los resultados y una valoración económica de su implantación y de sus efectos.

### 3. ÁREA DE ESTUDIO

#### 3.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El presente proyecto se desarrolla en una pequeña cuenca hidrológica localizada en la comarca de la Anoia, Cataluña, a unos 30 km al suroeste de Barcelona UTM 31, ED50 (X: 397339.112; Y: 4598302.378). El área de estudio es una zona de 46,4 ha (Figura 1) situada en el término municipal de Els Hostalets de Pierola. La Figura 2, presenta la delimitación del área de estudio.

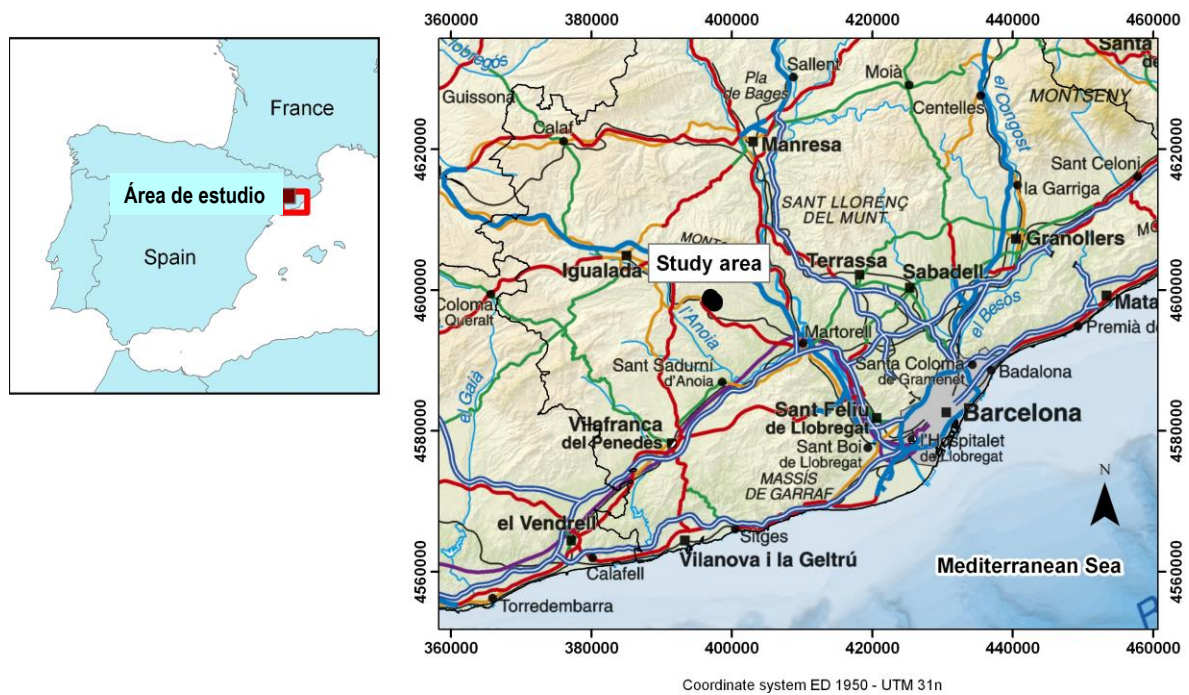


Figura 1: Localización de la zona estudio

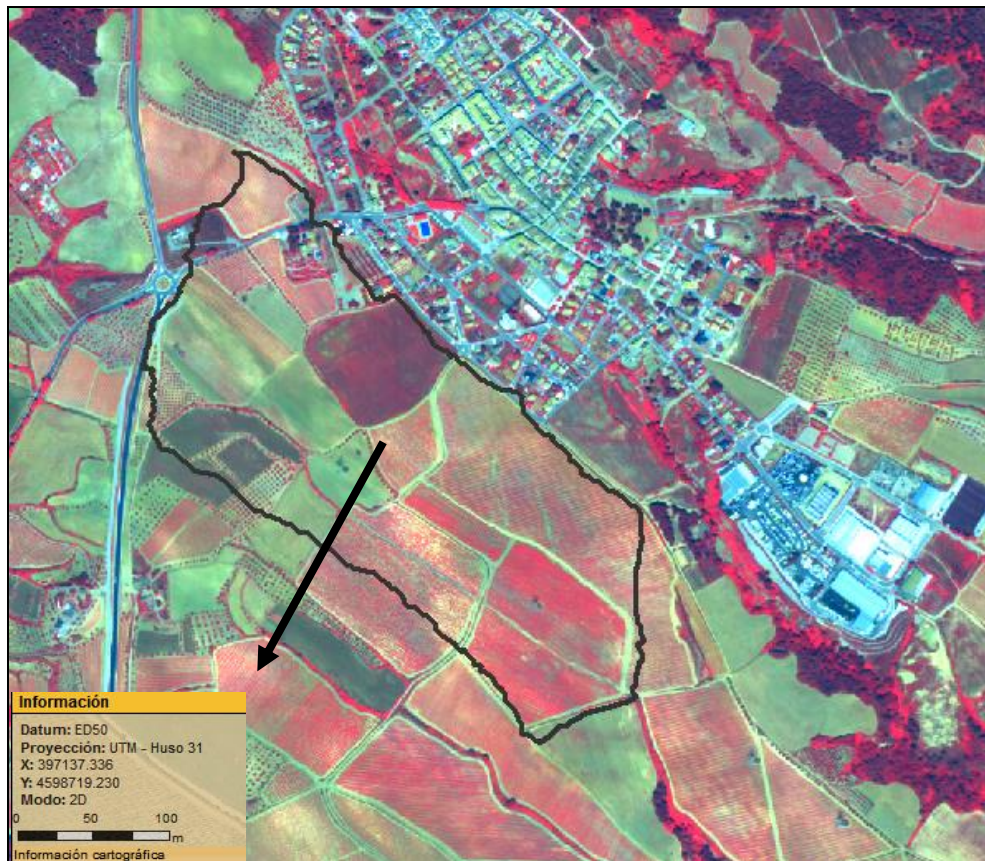


Figura 2: Delimitación del área de estudio

El área de estudio forma parte de la Depresión Terciaria del Penedés, con materiales poco consolidados como calcilutitas, lutitas, areniscas y conglomerados poco cementados, dicha depresión es de origen tectónico. El tipo de clima es Mediterráneo, con una temperatura anual media de 15 °C y una precipitación media anual de 520 mm (Ramos and Martínez-Casasnovas 2010). Las precipitaciones principales ocurren dentro de dos periodos: septiembre a noviembre y de abril a junio. En otoño son frecuentes las tormentas con intensidades elevadas, lo que les confiere un carácter altamente erosivo (Ramos 2002). La cuenca objeto de estudio, presenta severos problemas de erosión y pérdidas de suelo y, consecuentemente, de nutrientes.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS

Extrayendo los datos climatológicos de la estación meteorológica de Els Hostalets de Pierola (Anoia), se presentan los gráficos de temperatura promedio de la zona entre el período 2008-2012 en la Figura 3, expresada en grados centígrados y desglosada por meses, obtenidos de la fuente IDESCAT. De manera análoga, se analizan los datos de la estación para mostrar la precipitación media de la zona registrada durante el periodo 2001-2012 presentados en la Figura 4.

A continuación en la Tabla 1, se detalla la ubicación de la estación meteorológica, que forma parte de la Xarxa del Servei de Meteorologia de Catalunya (XAC), fuente de los datos climatológicos usados en el TFG:

Tabla 1: Ubicación estación meteorológica de referencia

ESTACIÓN ELS HOSTALETES DE PIEROLA		
<b>Coordenadas UTM</b>	X: 400664	Y:4598606
<b>Altitud</b>	316 metros	

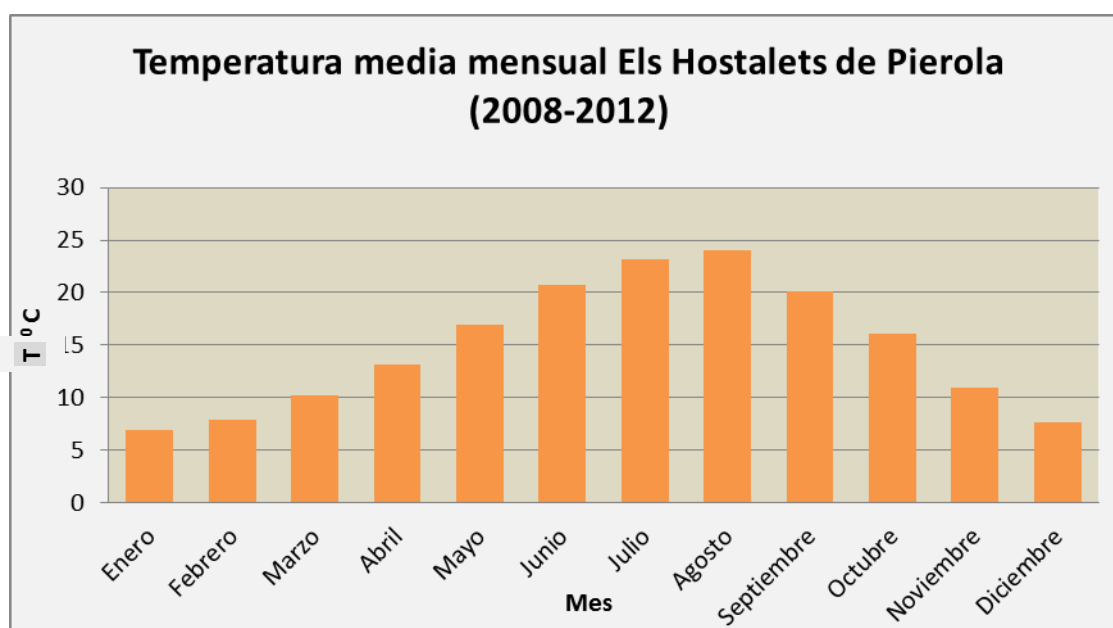


Figura 3: Temperatura media mensual en la estación Els Hostalets de Pierola

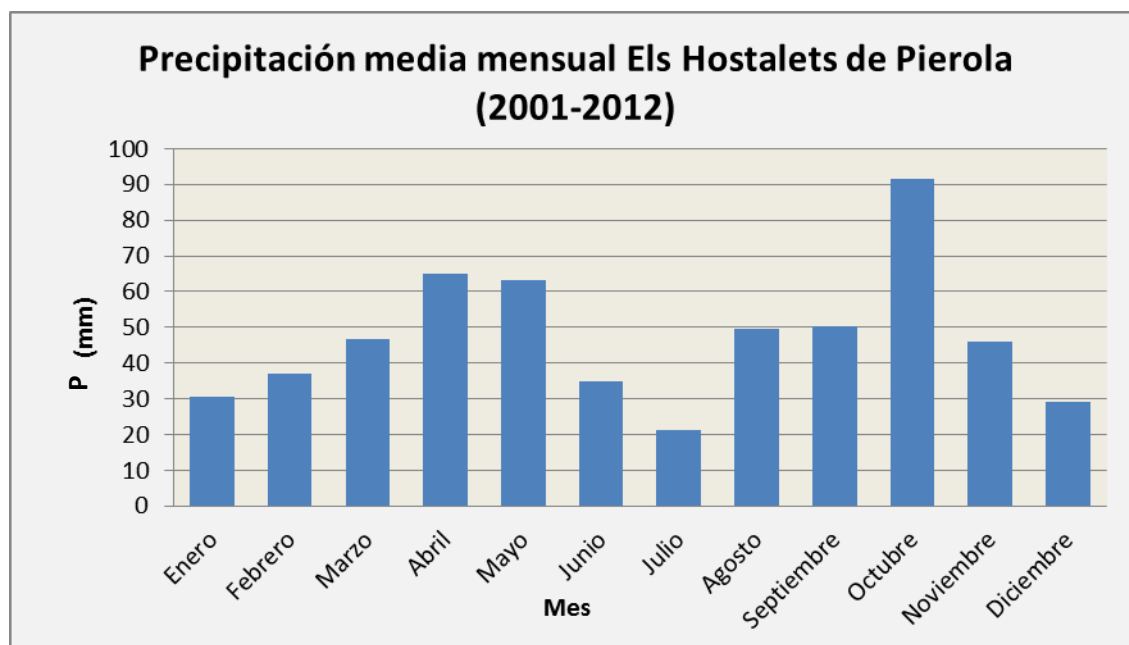


Figura 4: Precipitación media mensual en la estación Els Hostalets de Pierola

### 3.3. CARACTERÍSTICAS DE LOS SUELOS Y USOS DEL SUELO

Los suelos son depósitos aluviales del Pleistoceno, que cubren un sustrato de margas areniscas y conglomerados poco consolidados del Mioceno. Los suelos presentan un elevado porcentaje de elementos gruesos de origen metamórfico. Según el mapa de suelos del Penedés (DAR 2008) los suelos más frecuentes en la cuenca se clasifican como Typic Xerorthents y Fluventic Haploxerepts.

El principal uso de la tierra agrícola en la región es la viña para la producción de vinos de alta calidad y cava. La viña ocupa el 40% de la superficie. Otros cultivos en la zona, que ocupan una superficie menor son olivos, árboles frutales y cereales que representan el (10%); un 15% es bosque y matorral (DARP, 1997). La vegetación arbórea está compuesta principalmente por *Pinus halepensis*, *Quercus ilex* y *Quercus faginea*. Las pendientes más pronunciadas afectadas por cárcavas, están cubiertas por este tipo de vegetación. Además, la presencia de especies herbáceas tales como *Arundo donax*, *Rubus ulmifolius*, *Cistus albidus*, *Rosmarinus officinalis* y *Thymus vulgaris* es común. El 35% restante de la superficie está urbanizado.





## **4. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **4.1. MODELO SWAT**

El modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool) es un modelo hidrológico a escala de cuenca hidrográfica. Fue desarrollado por Arnold et al. (1990) para el USDA y Agricultural Research Service (ARS). SWAT fue desarrollado para predecir y simular el impacto de los procesos medioambientales y del paisaje, prácticas de gestión de aguas, sedimentos y los rendimientos de los componentes químicos agrícolas en cuencas con diferentes tipos de suelos, uso del suelo y condiciones de manejo en largos periodos de tiempo.

El modelo tiene las siguientes características:

- Tiene base física. Más que incorporar ecuaciones de regresión para describir la relación entre variables de entrada y salida del modelo, SWAT requiere información específica sobre el clima, las propiedades del suelo, la topografía, la vegetación y las prácticas de manejo del suelo que se realizan en la cuenca. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, el movimiento de sedimentos, el crecimiento del cultivo, el ciclo de nutrientes, etc., están directamente modelados por SWAT utilizando estos datos de entrada. Los beneficios de este enfoque son: que las cuencas sin datos de monitoreo pueden ser modeladas o predichas y el impacto relativo de los datos de entrada alternativos (diferentes prácticas de manejo, clima, vegetación, etc.) sobre la calidad del agua y otras variables de interés pueden ser cuantificados.
- Utiliza datos fácilmente disponibles. SWAT se puede utilizar para estudiar los procesos más especializados, como el transporte de bacterias. Existe una amplia base de los datos mínimos necesarios para hacer una ejecución del programa que se ha ido generando a lo largo de los años.
- Su cálculo es eficiente. Simulación de cuencas de gran tamaño o de una variedad de estrategias de gestión se puede realizar sin una inversión excesiva de tiempo o dinero.
- Permite a los usuarios estudiar impactos a largo plazo. Permite analizar procesos que implican la acumulación gradual de los contaminantes y el impacto en las masas de agua río abajo.

SWAT es un modelo de rendimiento a largo plazo. El modelo no está diseñado para simular el detalle, de la inundación que puede causar un solo evento en un momento concreto.

SWAT incorpora características de varios de los modelos del ARS (Agricultural Research Service) y es una consecuencia directa del modelo SWRRB (Simulador de los recursos hídricos en las cuencas rurales) (Williams et al. 1985; Arnold et al. 1990). Otros modelos específicos que han contribuido de manera significativa al desarrollo de SWAT han sido: CREAMS (Knisel 1980), GLEAMS (Leonard et al. 1987) y EPIC (Williams et al. 1984).

El modelo SWAT divide la cuenca en un número de subcuencas, teniendo en cuenta la topografía y un umbral del área de drenaje definido por el usuario (área mínima requerida para iniciar un flujo concentrado). Cada subcuenca se divide en unidades de respuesta hidrológica (HRU), que son una combinación única de tipo de suelo, uso del suelo y pendiente. La unidad de respuesta hidrológica es el componente del paisaje más pequeño que SWAT usa para el cálculo de los procesos hidrológicos. Los procesos hidrológicos están divididos en dos fases: la fase de la tierra donde el modelo determina las tierras altas de cargas de flujo, sedimentos, nutrientes y pesticidas desde cada HRU y luego estas cargas son ponderadas a escala de subcuenca; y la segunda fase de canal /llanura inundable, donde el modelo define la ruta de las cargas de las tierras altas de cada subcuenca a través de la canal / red de flujo.

Dentro de cada unidad de respuesta hidrológica (HRU), los principales procesos hidrológicos simulados por SWAT incluyen la intercepción de la precipitación por la vegetación, la infiltración, la escorrentía, la evapotranspiración, el flujo lateral o flujo subterráneo, flujo superficial del agua subterránea (o flujo base o el flujo de retorno), la redistribución de la humedad del suelo, y percolación al acuífero profundo (Figura 5). La precipitación que entra, la fusión de la nieve y el agua de riego se reparte entre la escorrentía superficial y la infiltración. El agua infiltrada se puede almacenar en el perfil del suelo, filtrarse a capas más profundas para llegar a un acuífero superficial y/o profundo, perderse a través de la evapotranspiración, o moverse en el suelo por movimiento lateral para alimentar de nuevo a la corriente de agua.

Los datos requeridos por el modelo SWAT respecto a la climatología incluyen datos diarios de la precipitación, la temperatura máxima y mínima, la radiación solar, la humedad relativa y la velocidad del viento. La evapotranspiración se puede estimar en el modelo por diferentes métodos (Hargreaves o Penman Monteith). Para estimar la escorrentía superficial se utiliza el método del número de curva (CN), según el cual, la escorrentía superficial es estimada como una función de CN diario ajustado por el contenido de humedad del suelo en ese día.

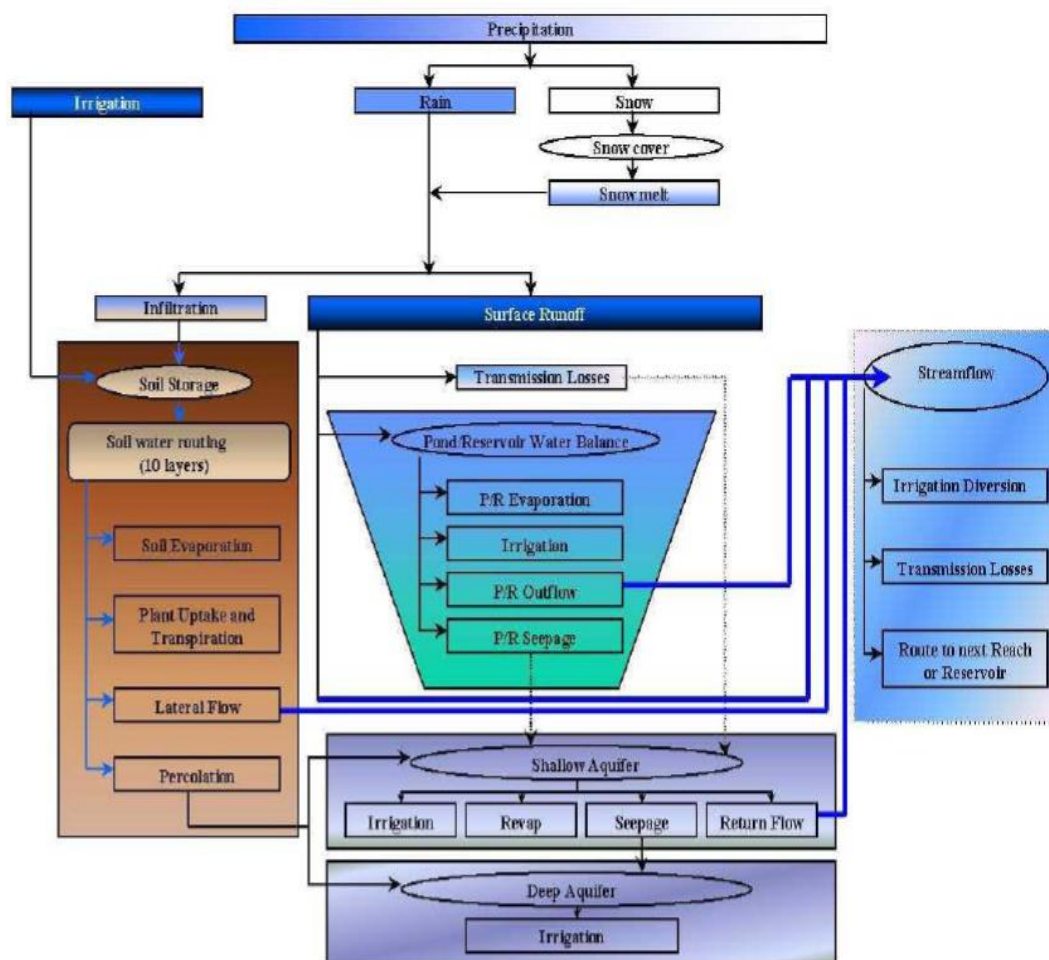


Figura 5: Esquema de los movimientos del agua en SWAT (Arnold, 1990)

#### 4.2. PARÁMETROS DE ENTRADA AL MODELO

La información referente a los suelos de la cuenca se ha tomado del mapa de (1:25,000) (DAR 2008), completado con algunas muestras adicionales dentro de la cuenca de estudio. La información introducida en el modelo para cada horizonte hace referencia a las características



texturales, contenido de carbono orgánico, conductividad hidráulica y factor K de erosionabilidad de suelos.

Además, se utilizó un modelo digital del terreno (MDT) con una resolución de 1m, que se había generado a partir de un vuelo fotogramétrico realizado en 2010.

La información de usos del suelo se generó a partir de fotos aéreas ortorectificadas tomadas en 2010 a escala 1:3000 y controles en campo.

La información climática, que incluía temperatura mínima y máxima, precipitación, radiación solar, velocidad de viento y humedad relativa se tomó del observatorio de Els Hostalets de Pierola situado a 2,5 km de la cuenca (Tabla 1).

El modelo se ha ejecutado en la versión ArcSWAT 2009.93.5, en base diaria.

#### **4.3. CARACTERIZACIÓN DE LA CUENCA DE ESTUDIO: APLICACIÓN DEL MODELO SWAT**

##### **4.3.1 USOS DEL SUELO**

En la Tabla 2, se presenta el resumen de las características de la cuenca en relación a los usos del suelo. Dentro de los usos del suelo podemos ver que la superficie que es ocupada por viñedos es de 29 ha, y que los siguientes usos más extendidos son la cebada de invierno con 4,38 ha y la alfalfa con 3,93 ha.

##### **4.3.2. TIPOS DE SUELO Y PENDIENTES**

Los suelos más frecuentes en la cuenca se clasifican como *Typic Xerorthents* y *Fluventic Haploxerepts*. La Figura 6, muestra el mapa con las series de suelos de la zona de estudio. Para la introducción de datos en el modelo se establecieron algunas agrupaciones y subdivisiones de las series de suelos teniendo en cuenta no sólo los datos del mapa de suelos, sino información de campo adicional tomada en 40 puntos distribuidos en la cuenca de estudio. La Figura 7, expone la distribución de las agrupaciones que son a las que se han referido todos los datos en el modelo.

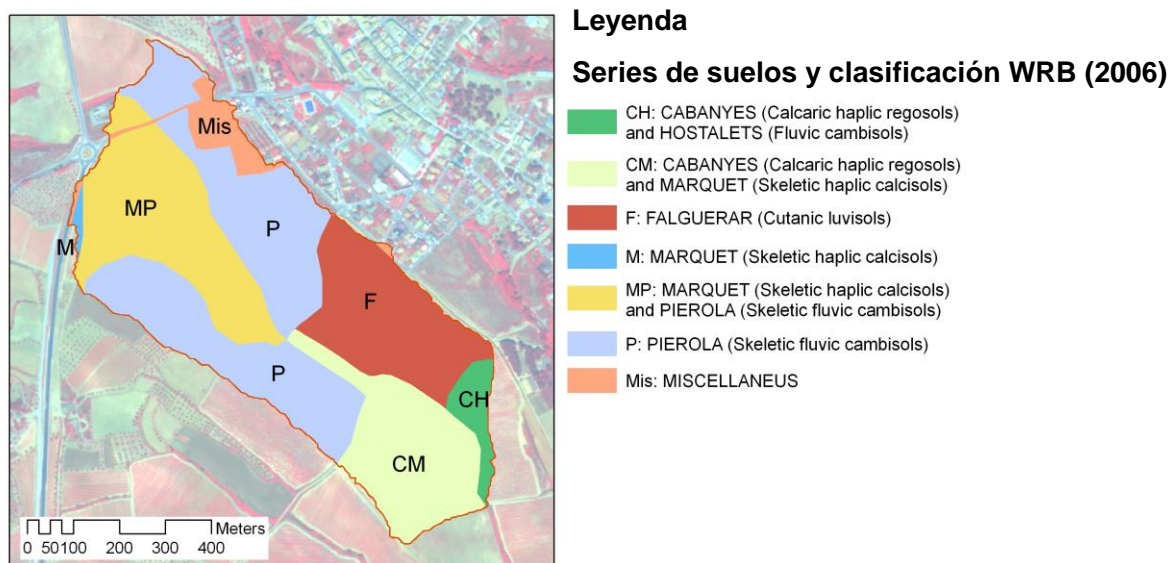


Figura 6: Series de suelos

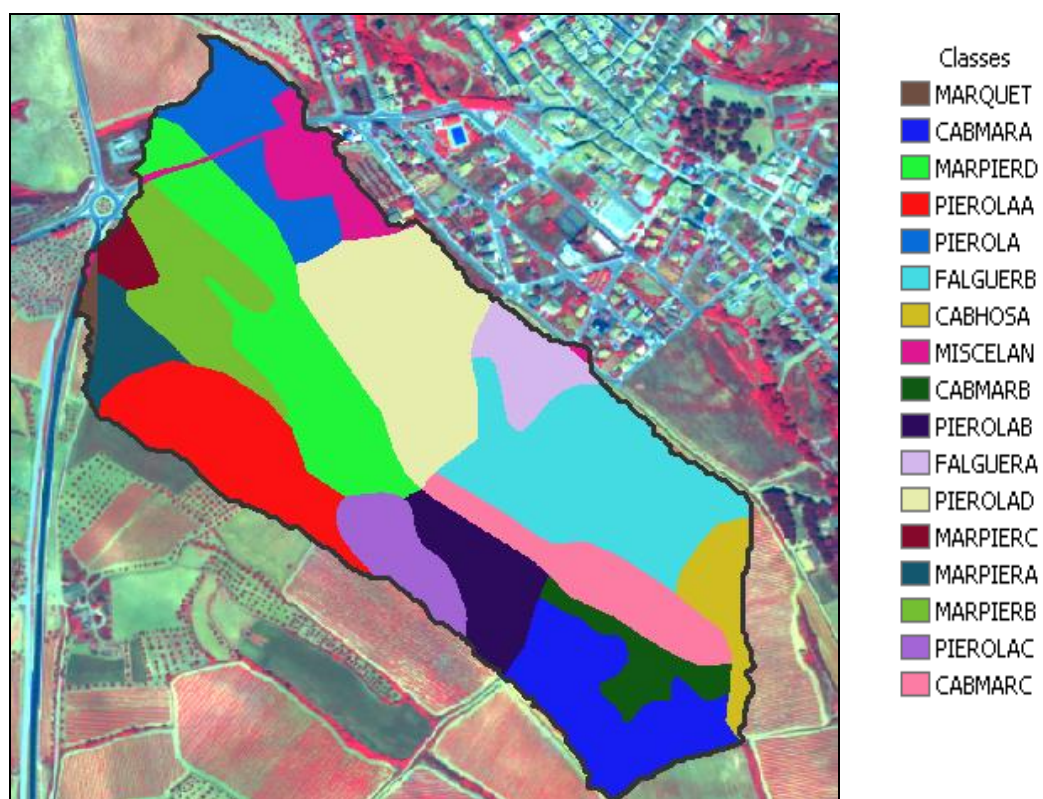


Figura 7: Distribución de las agrupaciones de series de suelo

La clasificación de las pendientes utilizada para la caracterización de las HRU y su grado representación en la cuenca se representa en la Tabla 2.

Tabla 2: Resumen área de estudio.

<b>ÁREA TOTAL CUENCA</b>		<b>46,4044 ha</b>
<b>NÚMERO TOTAL SUBCUENCAS</b>	<b>34</b>	
<b>USOS DEL SUELO</b>	<b>ÁREA OCUPA (ha)</b>	<b>% ÁREA CUENCA</b>
-Carreteras (UTRN)	0,26	0,57
-Caminos (UPRO)	2,41	5,21
-Olivos (OLIV)	2,20	4,74
-Viñedos (GRAP)	29,15	62,81
-Pasturas (SWRN)	1,63	3,52
-Urbanizado (URLD)	1,64	3,54
-Pastos de invierno (WPAS)	0,79	1,69
-Alfalfa (ALFA)	3,93	8,48
-Cebada (WBAR)	4,38	9,45
<b>AGRUPACIÓN SERIES DE SUELOS</b>	<b>ÁREA OCUPA (ha)</b>	<b>% ÁREA CUENCA</b>
-CABHOSA	1,46	3,16
-CABMARA	3,88	8,35
-CABMARB	1,40	3,02
-CABMARC	2,64	5,69
-FALGUERA	1,52	3,27
-FALGUERB	6,58	14,18
-MARPIERA	1,15	2,48
-MARPIERB	2,98	6,48
-MARPIERC	0,57	1,23
-MARPIERD	5,54	11,93
-MARQUET	0,20	0,44
-MISCELAN	1,88	4,05
-PIEROLA	2,73	5,89
-PIEROLAA	4,16	8,97
-PIEROLAB	2,23	4,80
-PIEROLAC	1,70	3,65
-PIEROLAD	5,78	12,46
<b>PENDIENTE (%)</b>	<b>ÁREA OCUPA (ha)</b>	<b>% ÁREA CUENCA</b>
0-2	2,35	5,05
2-5	12,49	26,91
5-10	23,56	50,77
10-15	6,36	13,70
>15 %	1,65	3,56

Los suelos con una pendiente comprendida entre el 5-10% se extienden en el 50% (23,56 ha) de la zona de estudio, mientras que las pendientes entre el 2-5% representan 12,48 ha. Cabe destacar que en la cuenca hay 8 ha que tienen pendientes superiores al 10%.

En la Figura 8, se detalla el mapa de las pendientes de la cuenca según la clasificación realizada, y en la Figura 9 se muestra el mapa de usos del suelo y su distribución en la cuenca. Se observa claramente que en los usos del suelo existe un claro predominio del cultivo de la vid, marcado en color cian.

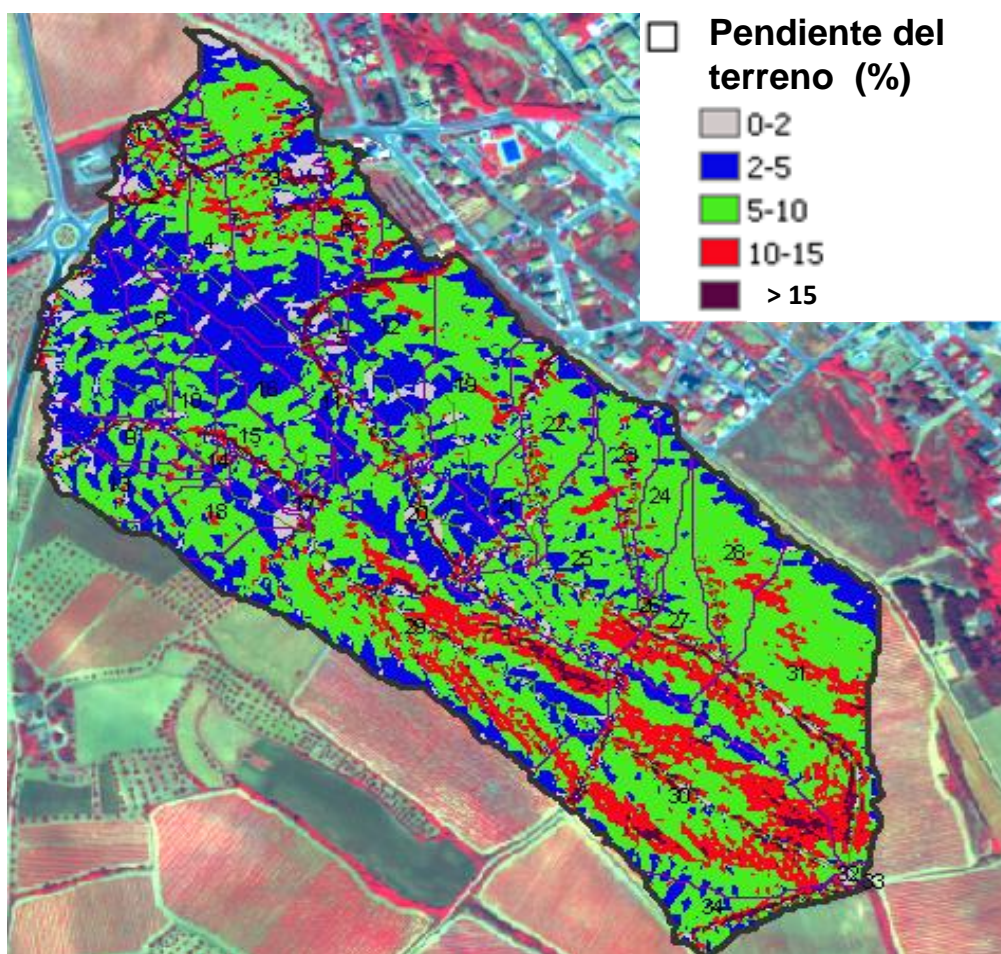


Figura 8: Mapa de pendientes de la zona de estudio



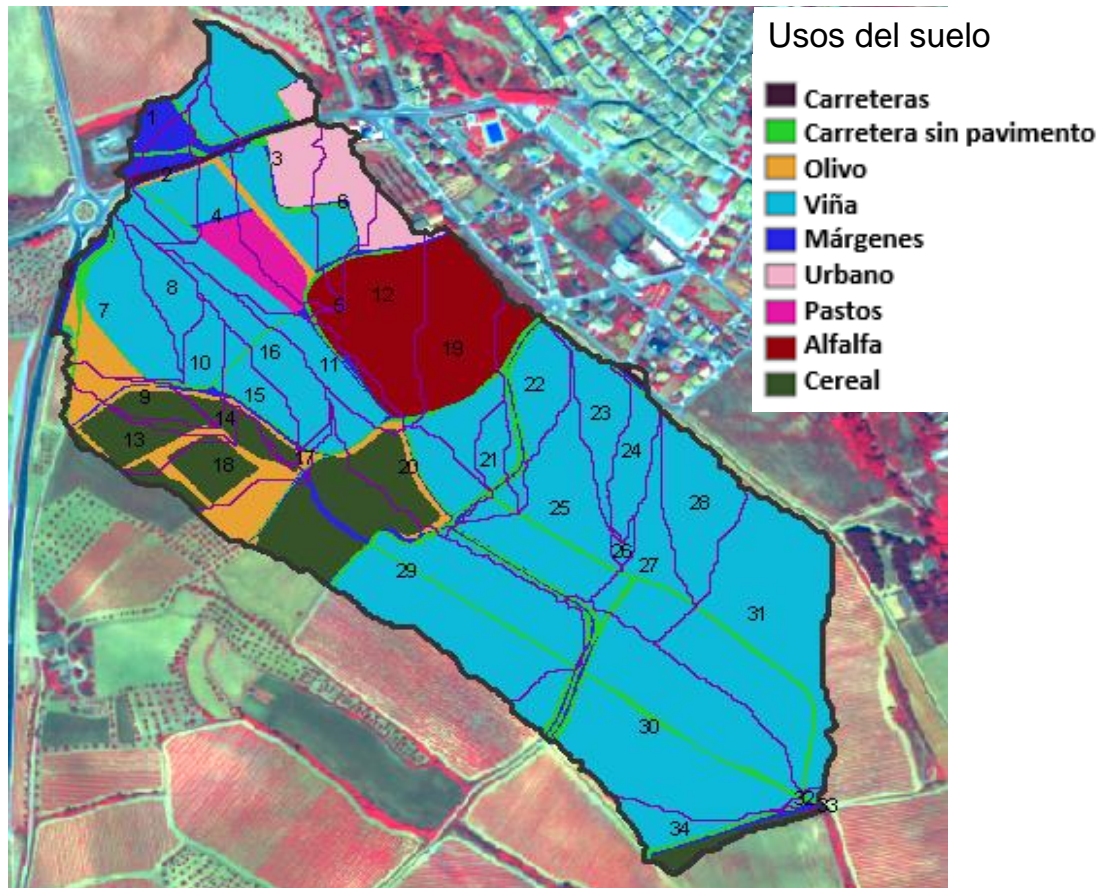


Figura 9: Mapa de usos del suelo de la zona de estudio

#### 4.3.3. DEFINICIÓN DE SUBCUENCAS EN LA ZONA DE ESTUDIO

Se observa que las subcuencas con mayor superficie son: 29, 30 y 31 como se indicará en la Tabla 3, con el resumen de las 34 subcuencas. Entre las subcuencas 29, 30 y 31, suman 15 ha del total de 46,4044 ha que tiene la cuenca, y en las tres, coinciden con el cultivo mayoritario, que es la vid y la pendiente con mayor presencia en dichas subcuencas es la de 5-10%. En cambio, las subcuencas con menor superficie son la 5 y la 33. La primera con una representación de 0,0092 ha equivalente al 0,02% del total de la cuenca y con uso de ALFALFA y pendientes 0-2%. En la subcuenca 33 de 0,0134 ha, equivalente al 0,03% del total, su principal uso es la pastura (SWRN: South Western Range) y con una pendiente  $\geq 5\%$ .



Figura 10: Mapa de la distribución de subcuencas de la zona estudio.

En la Tabla 3, se exponen los usos del suelo en cada una de las subcuencas, así como los usos mayoritarios del suelo que existen en la subcuenca, el área que ocupan dentro de la misma y el porcentaje de área que representan del total de la cuenca junto con los intervalos de pendientes de cada uno de ellos y lo que representan respecto a esa subcuenca y al total de la cuenca. En la Tabla 3 se presenta la información de cada una de las 34 subcuencas identificadas en la zona de estudio. Cada número de subcuenca corresponde a los descritos en la Figura 10, a fin de poder ver su localización.



Tabla 3: Resumen de las 34 subcuencas

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
1	0,6096	1,31 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,3224	0,69 %
SWRN	0,2455	0,53 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERB	0,2254	0,49 %
MARPIERD	0,1839	0,40 %
PIEROLA	0,1932	0,42 %
<b>PENDIENTES %</b>		
2-5	0,2448	0,53 %
0-2	0,0809	0,17 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
2	0,8701	1,88 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,4060	0,87 %
SWRN	0,3018	0,65 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERB	0,1579	0,34 %
MARPIERD	0,5973	1,29 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,3005	0,65 %
5-10	0,3438	0,74 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
3	3,1255	6,74 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	1,5178	3,27 %
URLD	0,6673	1,44 %
WPAS	0,4208	0,91 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLA	1,7613	3,80 %
MISCELAN	0,7027	1,51 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	1,5457	3,33 %
2-5	0,8447	1,82 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
4	1,5376	3,31 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,9184	1,98 %
WPAS	0,3643	0,79 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERD	0,7376	1,59 %
MARPIERB	0,3986	0,86 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,7072	1,52 %
5-10	0,5317	1,15 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
5	0,0092	0,02 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
ALFA	0,092	0,02 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAD	0,0092	0,02 %
<b>PENDIENTE %</b>		
0-2	0,0081	0,02 %





SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
6	1,0715	2,31 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,2766	0,60 %
URLD	0,6287	1,35 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MISCELAN	0,6287	1,35 %
PIEROLA	0,3597	0,78 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,2841	0,61 %
5-10	0,5349	1,15 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
7	1,9019	4,10 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	1,1394	2,46 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERA	0,6624	1,43 %
MARPIERC	0,5588	1,20 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,8318	1,79 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
8	0,6360	1,37%
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,6360	1,37 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERB	0,6227	1,34 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,3541	0,76 %
5-10	0,2408	0,52 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
9	0,6260	1,35 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
OLIV	0,2437	0,53 %
WBAR	0,3338	0,72 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAA	0,3488	0,75 %
MARPIERA	0,2551	0,55 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,2778	0,60 %
5-10	0,2552	0,55 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
10	0,6195	1,34 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,4336	0,93 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERB	0,4659	1,00 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	0,3651	0,79 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
11	0,8739	1,88 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,6001	1,29 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERD	0,6297	1,36 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,3758	0,81 %
5-10	0,3520	0,76 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
12	2,0712	4,46 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
ALFA	1,6681	3,59 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAD	1,7442	3,76 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,8893	1,92 %
5-10	0,8244	1,78 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
13	0,8906	1,92 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
WBAR	0,6889	1,22 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAA	0,6889	1,48 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,3179	0,69 %
5-10	0,3986	0,86 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
14	0,2091	0,45 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
WBAR	0,1666	0,36 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAA	0,2091	0,45 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	0,1075	0,23 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
15	0,6946	1,50 %
<b>USO MAYORITARIO</b>		
GRAP	0,4796	1,03 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERB	0,3687	0,79 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	0,3615	0,78 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
16	1,0370	2,23 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	1,0151	2,19 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERD	0,8066	1,74 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,5863	1,26 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
17	0,1197	0,26 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,0493	0,11 %
OLIV	0,0301	0,06 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERD	0,835	0,18 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,0561	0,12 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
18	1,0759	2,32%
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
WBAR	0,8001	1,72 %
OLIV	0,2649	0,57 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAA	1,0759	2,32 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,3786	0,82
5-10	0,5803	1,25

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
19	2,2758	4,90%
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
ALFA	1,7019	3,67 %
GRAP	0,4907	1,06 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAD	2,2501	4,85 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,6768	1,46
5-10	1,4179	3,06

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
20	1,5303	3.30 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,6872	1,48 %
WBAR	0,5727	1,23 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
MARPIERD	0,8704	1,88 %
PIEROLAD	0,6410	1,38 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,8346	1,80 %
5-10	0,4601	0,99 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
21	0,4869	1,05 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,4343	0,94 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAD	0,3176	0,68 %
FALGUERB	0,1503	0,32 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,1594	0,34 %
5-10	0,2770	0,60 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
22	1,3953	3,01 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,9008	1,94 %
ALFA	0,2423	0,52 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERA	0,5823	1,25 %
PIEROLAD	0,4404	0,95 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,2434	0,52 %
5-10	0,9083	1,96 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
23	0,8590	1,85 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,8559	1,84 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERA	0,5730	1,23 %
FALGUERB	0,2860	0,62 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,1544	0,33 %
5-10	0,5845	1,26 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
24	0,7460	1,61 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,6625	1,43 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERB	0,5900	1,27 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	0,5540	1,19 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
25	2,3921	5,15 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	2,1894	4,72 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERB	1,4335	3,09 %
CABMARC	0,5873	1,27 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	1,5414	3,32 %
2-5	0,4489	0,97 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
26	0,0921	0,20 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,0921	0,20 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERB	0,0921	0,20 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,0150	0,03 %
5-10	0,0593	0,13 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
27	1,2427	2,68 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	1,1575	2,49 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERB	0,7684	1,66 %
<b>PENDIENTE %</b>		
10-15	0,2789	0,60 %
5-10	0,7814	1,68 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
28	1,3982	3,01 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	1,3970	3,01 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERB	1,3982	3,01 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	0,2146	0,46 %
5-10	1,0196	2,20 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
29	5,7496	12,39 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	3,3377	7,19 %
WBAR	1,5266	3,29 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
PIEROLAC	1,6937	3,65 %
PIEROLAB	1,6300	3,51 %
PIEROLAA	1,5770	3,40 %
<b>PENDIENTE %</b>		
2-5	1,3094	2,82 %
5-10	2,7726	5,97 %
10-15	1,2117	2,61 %





SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
30	4,9947	10,76 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	4,4837	9,66 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
CABMARA	2,8998	6,25 %
CABMARB	1,2294	2,65 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	2,3421	5,05 %
10-15	1,7518	3,78 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
31	4,3159	9,30 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	4,1643	8,97 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
FALGUERB	1,4802	3,19 %
CABHOSA	1,4336	3,09 %
CABMARC	1,1669	2,51 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	2,5154	5,42 %
10-15	1,0444	2,25 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
32	0,0726	0,16 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,0399	0,09 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
CABMARA	0,0458	0,10 %
CABHOSA	0,0268	0,06 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	0,0303	0,07 %
0-2	0,0220	0,05 %



SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
33	0,0134	0,03 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
SWRN	0,0101	0,02 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
CABMARA	0,0082	0,02 %
CABHOSA	0,0052	0,01 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	0,0051	0,01 %
>15	0,0044	0,01 %

SUBCUENCA	ÁREA OCUPA (ha)	% ÁREA CUENCA TOTAL
34	0,8609	1,86 %
<b>USOS SUELO MAYORITARIOS</b>		
GRAP	0,4473	0,96 %
WBAR	0,2262	0,49 %
<b>AGRUPACIONES SERIES DE SUELOS</b>		
CABMARA	0,8609	1,86 %
<b>PENDIENTE %</b>		
5-10	0,4525	0,98 %
2-5	0,1929	0,42 %

#### 4.4. CALIBRACIÓN Y RESULTADOS DEL MODELO

El modelo se calibró y validó con datos obtenidos en dos subcuencas, concretamente la subcuenca 25 (S\_25) y subcuenca 31 (S\_31). El presente estudio partió con el modelo SWAT calibrado, aun así, se incluyen los datos de calibración-validación.

Para la calibración y la validación se utilizaron dos años completos (mayo 2010 a mayo 2012). Los parámetros de control fueron el contenido de agua en el suelo, la escorrentía, y las pérdidas de suelo y nutrientes. En cada una de los dos subcuencas se midió de forma continua, el agua del suelo a 4 profundidades de 10 a 100 cm, utilizando sondas de capacitancia FDR (Frequency Domain REflectometry)- Decagon, previamente calibradas por gravimetría. En las mismas zonas se tomaron muestras de escorrentía tras los sucesos de lluvia que provocaron escorrentía.

La escorrentía total se estimó teniendo en cuenta la infiltración base y la humedad precedente. Los valores obtenidos se compararon con los simulados por el modelo ejecutado en base diaria. Las pérdidas de suelo y nutrientes se estimaron a partir de las concentraciones de suelo y nutrientes en las muestras de escorrentía recogidas. La concentración de sedimentos en la escorrentía se calculó en una alícuota, que se secó a 105°C y se pesó posteriormente. Para las medidas de fósforo (P) y nitrógeno (N) se utilizaron otras alícuotas.

Para el fósforo (P) disuelto, se filtró la muestra con un papel de filtro de tamaño de poro de 0.45  $\mu\text{m}$  y para el fósforo (P) total se realizó una digestión con  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y persulfato potásico. En ambos casos la lectura se llevó a cabo siguiendo el método de Murphy y Riley (1962). El nitrógeno en forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ) se midió utilizando Nitra-testchek y el nitrógeno orgánico (nitrógeno Kjeldahl) se determinó por destilación (American Public Health Association 1998). La concentración de sedimentos y nutrientes en la escorrentía conjuntamente con los volúmenes de escorrentía permitieron obtener la cantidad total de suelo y nutrientes perdidos.

Para analizar la bondad de ajuste del modelo se utilizaron tres estadísticos, tanto para la calibración como para la validación: el Nash–Sutcliffe efficiency (NSE; Nash and Sutcliffe 1970), el PBIAS% (Gupta et al. 1999) y la ratio entre el error cuadrático medio y la desviación estándar (RSR), véase Tabla 4.

Tabla 4: Fórmulas estadísticas empleadas en la calibración

Fórmulas estadísticas para el ajuste del modelo
$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_s)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y})^2}$
$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_s) * 100}{\sum_{i=1}^n (Y_m)}$
$RSR = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_m - Y_s)^2}}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_m - \bar{Y})^2}}$

Seguidamente se presentan las Figuras 11, 12, 13 y 14, que corresponden a gráficos de la calibración-validación de las dos subcuencas 25 y 31.

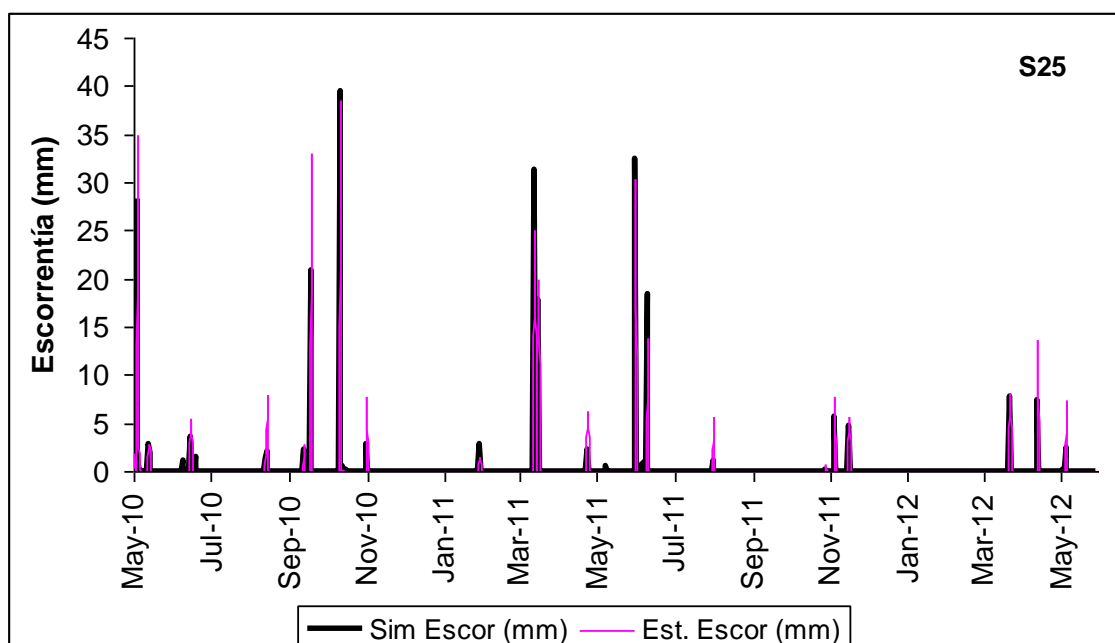


Figura 11: Datos calibración-validación escorrentía subcuenca 25

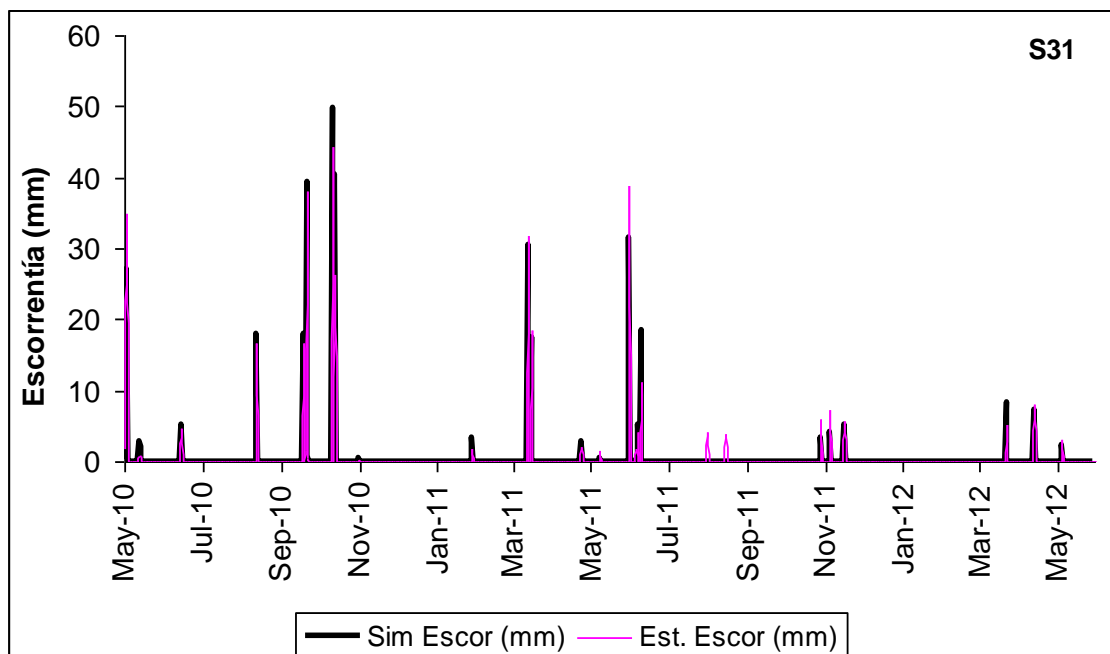


Figura 12: Datos calibración-validación escorrentia subcuenca 31

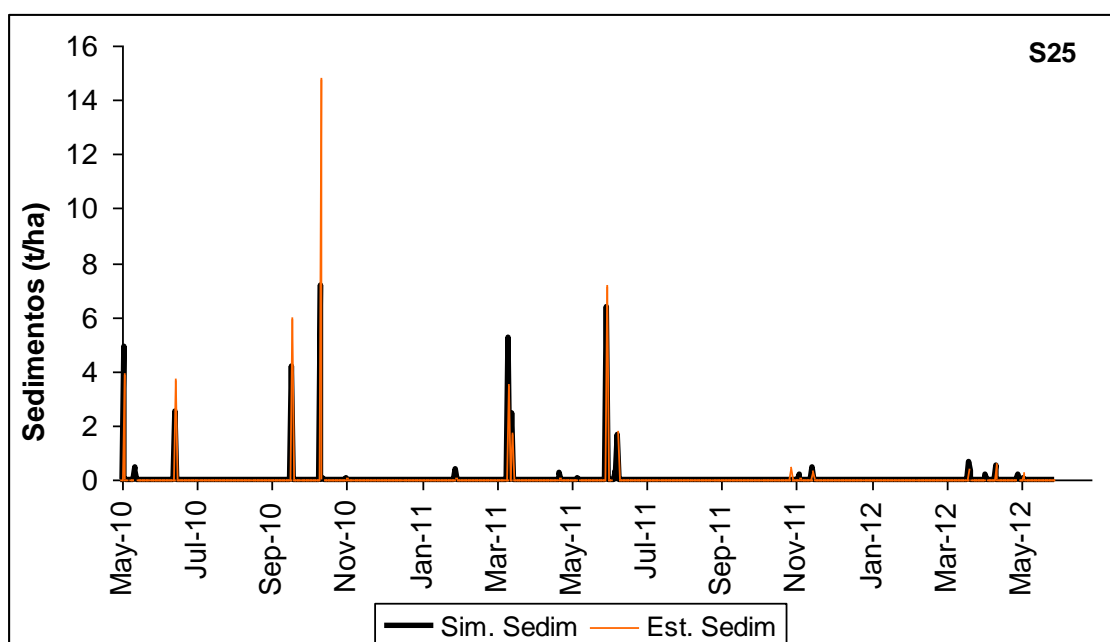


Figura 13: Datos calibración-validación sedimentos subcuenca 25

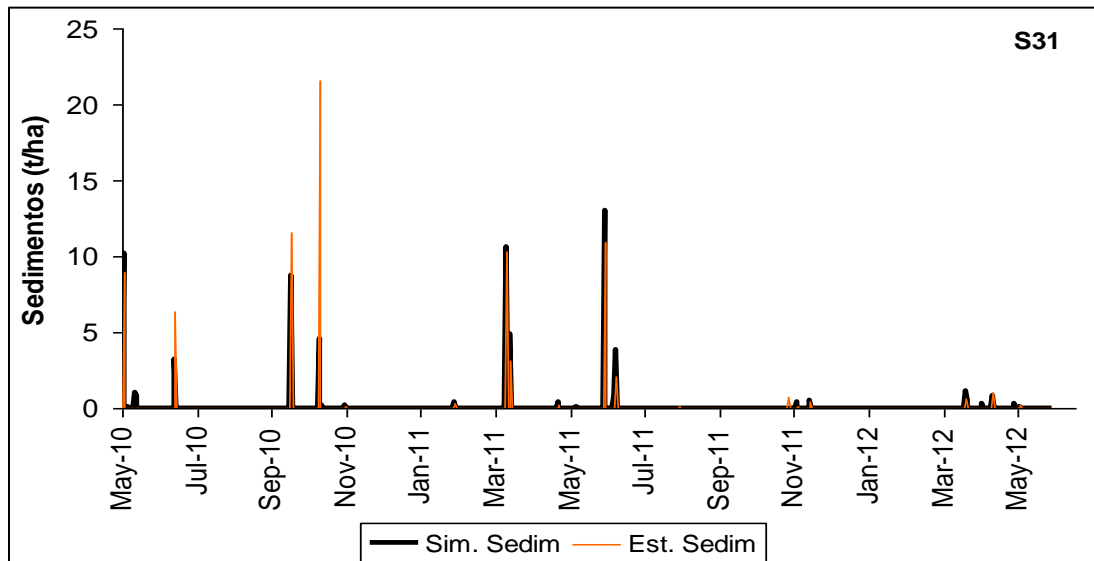


Figura 14: Datos calibración-validación sedimentos subcuenca 31

La Tabla 5 muestra los resultados de la calibración con los test utilizados, la escorrentia, las pérdidas de suelo y las de nutrientes (nitrógeno y fósforo) para los dos períodos, calibración y validación. De acuerdo con los criterios de Moriasi et al. (2007), la calibración se puede considerar satisfactoria, teniendo en cuenta que se ha realizado en base diaria. Si  $NSE > 0,5$  y el  $RSR \leq 0,70$  y PBIAS para escorrentia  $\pm 25\%$ , PBIAS para pérdidas de suelo es  $\pm 55\%$  y PBIAS  $\pm 70\%$  para perdidas de nutrientes (nitrógeno y fósforo).

Tabla 5: Estadísticos obtenidos en la calibración y validación del modelo

		RSR	PBIAS %	NSE	RSR	PBIAS %	NSE
Calibración				Validación			
Escorrentía	S25	0.381	-16.33	0.885	0.528	-13.82	0.817
	S31	0.421	-16.20	0.637	0.384	-8.96	0.881
Pérdidas de suelo	S25	0.517	-15.79	0.663	0.714	8.63	0.714
	S31	0.139	-28.70	0.331	0.281	23.12	0.910
Pérdidas de nutrientes	N_S25	0.342	15.30	0.953	0.868	3.23	0.994
	N_S31	0.357	7.800	0.947	0.755	13.86	0.800
	P_S25	0.724	23.43	0.827	0.913	25.49	0.902
	P_S31	0.802	18.25	0.849	0.327	7.55	0.870

## 5. MEDIDAS DE CONSERVACIÓN, ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS Y DISEÑO

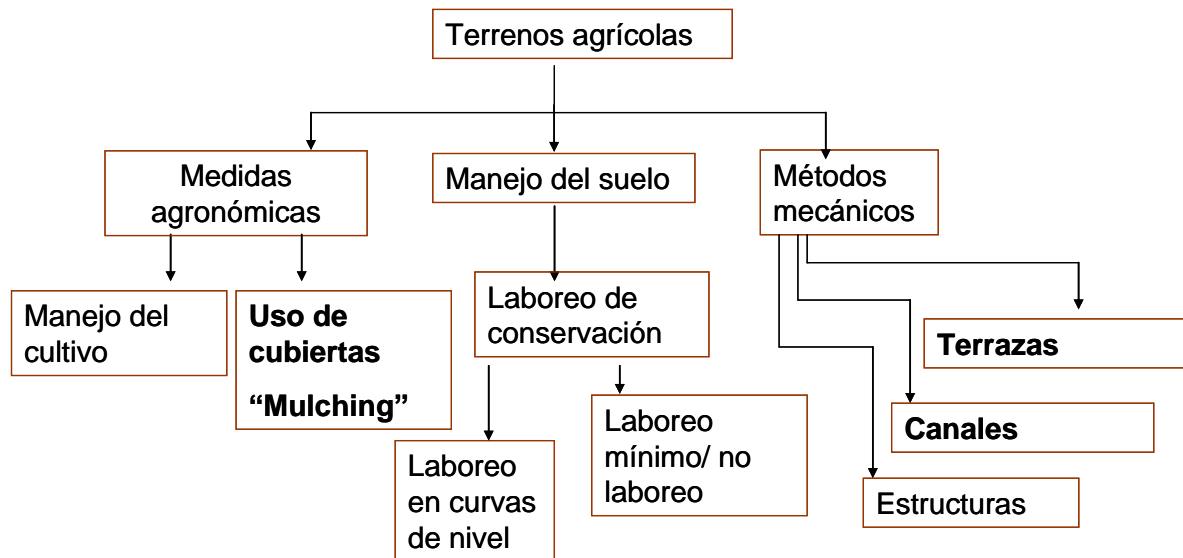
Las medidas de conservación que se puedan proponer han de tener en cuenta las características de los suelos, las pendientes del terreno y los usos de la tierra y su manejo. Como ya se ha comentado, en la cuenca de estudio los signos de erosión son evidentes tras los sucesos de lluvia de elevada intensidad (Figura 15). Debido a las características de los suelos, con moderada o baja velocidad de infiltración, el exceso de agua durante dichos eventos circula en superficie con velocidades erosivas. Por tanto, las medidas a proponer deberían de ir encaminadas a mejorar la infiltración, proteger la superficie del suelo y/o disminuir la velocidad del agua de escorrentía.



Figura 15: Cárcavas formadas en la cuenca de estudio

### 5.1 MEDIDAS DE CONSERVACIÓN

La Figura 16, esquematiza las medidas de conservación que se puede utilizar en terrenos agrícolas. Las diferentes técnicas de conservación pueden describirse agrupándose como medidas agronómicas, de manejo del suelo y métodos mecánicos.



Adaptado de El-Swaify, Dangler y Ammstrog, (1982)

Figura 16: Esquema de las diferentes medidas de conservación

Las medidas agronómicas utilizan la vegetación para proteger el suelo frente a la erosión. El manejo del suelo se relaciona con las formas de prepararlo para favorecer el desarrollo vegetal y con la mejora de su estructura para que sea más resistente a la erosión. Los métodos mecánicos o físicos, frecuentemente relacionados con aspectos de la ingeniería, incluyen desde la modificación de la topografía, por ejemplo, la construcción de terrazas y canales o la instalación de cortavientos para reducir la erosión hídrica o eólica, respectivamente. Las medidas agronómicas, combinadas con un buen manejo del suelo, pueden influir sobre las fases de desprendimiento y transporte, mientras que los métodos mecánicos son efectivos para controlar la fase de transporte, pero tienen escasa actuación en la fase de desprendimiento.

Generalmente, se da preferencia a las medidas agronómicas ya que resultan menos costosas y permiten reducir de forma directa los impactos de la lluvia, aumentar la infiltración, reducir el volumen de la escorrentía y reducir la velocidad del agua. Además, pueden ajustarse más fácilmente a los sistemas agrícolas existentes. Las medidas mecánicas, aunque no actúan en la fase de desprendimiento de las partículas del suelo, pueden ser muy efectivas en la fase de





transporte. Su principal función es complementar las medidas agronómicas y se utilizan para controlar cualquier exceso de agua o viento que aparezca (Morgan 1995).

El éxito final de los programas de conservación depende de la medida en que los problemas erosivos hayan sido identificados, de la idoneidad de las medidas de conservación seleccionadas para controlar el problema, y de la disposición de los agricultores y restantes agentes relacionados para llevarlas a cabo.

Se crea riesgo de erosión en las tierras que se cultivan cuando arrancamos árboles, matorrales y pastos silvestres. La erosión se ve intensificada cuando se cultiva en laderas con pendientes pronunciadas disponiendo el cultivo de la misma manera que las curvas de nivel siguiendo la pendiente máxima, realizando un monocultivo, con inadecuada fertilización, empobreciendo el suelo de materia orgánica y otros elementos, la creación de una suela de labor por el paso continuado de la maquinaria agrícola pesada.

Para el control de la erosión, puede ser útil la combinación de diferentes medidas de entre las indicadas en la Figura 16. El control de la erosión debe basarse en medidas agronómicas y de manejo del suelo, siendo necesaria la introducción de métodos mecánicos cuando las pendientes son elevadas.

Está constatado de que la vid es uno de los cultivos que puede producir un alto riesgo de erosión. Dado que la vid es el cultivo mayoritario de la cuenca de estudio procederemos a valorar diferentes medidas para reducir la elevada tasa de erosión que presenta la cuenca en la actualidad.

## **5.2. ANÁLISIS DE ALTERNATIVAS**

En el análisis de alternativas se han tenido en cuenta tanto las prácticas que tradicionalmente se han aplicado en la zona como aquellas que no han sido frecuentemente aceptadas por sus agricultores. Una de las medidas de conservación que se había utilizado tradicionalmente eran las terrazas de desagüe, localmente denominadas “rases”. La preparación de las nuevas parcelas para la mecanización de prácticamente todas las labores ha hecho abandonar su práctica, no obstante es una de las medidas cuya efectividad ha sido probada en la zona (Ramos and Porta, 1997). Por ello se ha pensado en la introducción de alguna medida de tipo

mecánico para controlar el movimiento del agua sobre la superficie del suelo. Por otro lado, se ha considerado la introducción de alguna medida agronómica que pueda proteger el suelo frente al desprendimiento de las partículas a la vez que ayude a reducir la velocidad del agua. Así pues, las medidas seleccionadas han sido: construcción de terrazas de desagüe e implantación de franjas de vegetación, la realización de un canal principal para desembocar las aguas recogidas en las terrazas y que dicho canal principal esté revegetado a fin de evitar su erosión y reducir las pérdidas de suelo y nutrientes.

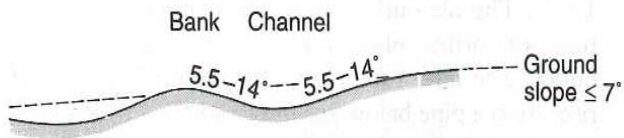
#### **5.2.1. MÉTODO MECÁNICO: Terrazas de desagüe “Broad terraces”**

La elección del tipo de terraza está estrechamente relacionada con el grado de la pendiente y la profundidad del suelo. De los diferentes tipos de terrazas: de drenaje, de absorción o banales, en este estudio, las más apropiadas serían las terrazas de drenaje. Su principal misión es interceptar la escorrentía y canalizarla a través de la ladera hacia una salida adecuada. (Morgan 1995).

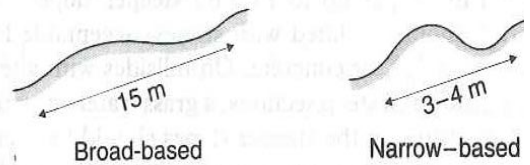
Las terrazas de desagüe son taludes de tierra contruidos transversalmente a la dirección de la pendiente para interceptar la escorrentía superficial y transportarla, con velocidad no erosiva, hacia una salida adecuada, y para acortar la longitud de la pendiente. Es necesario tomar decisiones sobre el espaciamiento y la longitud de las terrazas, la localización de los desagües, la pendiente y dimensiones de los canales de drenaje y el diseño del sistema de terrazas. La Figura 17, muestra un esquema de los diferentes tipos de terrazas de desagüe (Morgan, 1995) y el Figura 18 representa la evacuación de aguas de las terrazas de desagüe desembocando en un canal principal (USDA-SCS Engineering Field Manual, 1984).

## DIVERSION TERRACE

Profile



Width



Construction

Earth movement

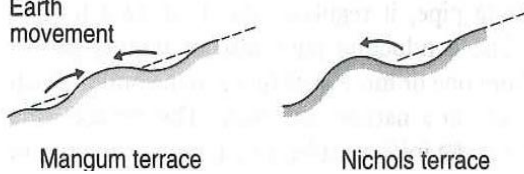


Figura 17: Tipos de terrazas de desagüe



Figura 18: Evacuación de aguas de las terrazas de desagüe a canal principal

Dichas terrazas:

- Reducen la longitud de las laderas y de la pendiente.
- Reducen la cuenca para la generación de escorrentía.
- Controlan la erosión por escorrentía (desprendimiento y transporte) pero no es efectivo para frenar la erosión por salpicadura (splash erosión).



### 5.2.2. MEDIDAS AGRONÓMICAS

Se emplea la vegetación a fin de proteger el suelo de la erosión y su consecuente pérdida de nutrientes, en diferentes vertientes. Las medidas agronómicas:

- Reducen la escorrentía, aumentando la intercepción y la infiltración
- Reducen la velocidad del flujo de agua (*sheet* erosión).
- Aumentan el almacenamiento en las depresiones de la superficie del suelo.
- Minimizan el desprendimiento de partículas y la concentración de sedimentos en el flujo.
- Aumentan la sedimentación (barreras de vegetación).

## 5.3. DISEÑO

### 5.3.1. DISEÑO DE LAS TERRAZAS DE DESAGÜE

Los cálculos que se realizaron para posteriormente cuantificar las actuaciones de implantar terrazas de desagüe en la cuenca, fueron los siguientes:

#### CÁLCULO DE TERRAZAS DE DESAGÜE

En primer lugar, cabe determinar el caudal a evacuar mediante la fórmula:

$$Q = C \cdot I_{TC} \cdot A \quad (\text{Ec. Método Racional})$$

Siendo:

**Q:** Flujo ( $\text{m}^3/\text{s}$ )

**C:** Coeficiente de escorrentía (cultivo, pendiente, textura)

**$I_{TC}$ :** Intensidad máxima esperable en el tiempo de concentración para el período de retorno fijado ( $\text{m/s}$ ).

**A:** área (depende del espacio entre dos terrazas) ( $\text{m}^2$ ).

Los otros datos de partida que se usaran son:

**L=** longitud de la terraza ( $\text{m}$ ) = 250 m

Separación entre terrazas = 24 m

**S** = pendiente de la terraza ( $\text{m/m}$ ) =  $1/250^1 = 0,004$

---

<sup>1</sup> Relación aceptada para asegurar una circulación del flujo de agua en el canal de desagüe.

A continuación, se procede a calcular el tiempo de concentración ( $T_c$ ) con la siguiente fórmula:

$$T_c = 0,02 \cdot \left[ \frac{L}{\sqrt{S}} \right]^{0,77} = 0,02 \cdot \left[ \frac{250}{\sqrt{0,004}} \right]^{0,77} = 11,766 \text{ min}$$

Una vez obtenido el tiempo de concentración se pasa a calcular la intensidad máxima para ese tiempo de concentración.

$$I_{TC} = 9,25 \cdot I_h \cdot T_c^{-0,55} = 9,25 \cdot 86,6 \cdot 11,766^{-0,55} = 206,444 \text{ mm/h}$$

Pasada la  $I_{TC}$  en m/s es igual a  **$5,733 \cdot 10^{-5}$  m/s**

Como Intensidad máxima horaria para un período de retorno de 10 años en la zona se toma  $I_h = 86,6 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$  (Ramos and Martínez Casanovas, 2009).

Seguidamente se procede a obtener el cálculo del caudal a desaguar con la fórmula:

$$Q = C \cdot I_{TC} \cdot A = 0,6 \cdot 5,733 \cdot 10^{-5} \cdot (24 \times 250) = 0,2064 \text{ m}^3/\text{s}$$

**A = Área = Longitud terrazas · Separación terrazas =  $250 \cdot 24 = 6000 \text{ m}^2$**

A continuación, se busca en las Tablas la velocidad máxima permisible  $V_c$  (m/s) del flujo de agua que mejor se adapte. Para el caso analizado se acepta  $V_c = 0,6 \text{ m/s}$  que corresponde al valor entre arena fina y gruesa para suelo desnudo, véase Tabla 6 extraída de (Schwab et al. 1990)

Tabla: 6 Valores velocidad máxima permisible del flujo de agua.

Material	Suelo desnudo	Pasto con cobertura media	Pasto con buena cobertura
• Arena limosa	0,3	0,75	1,5
• Arena fina	0,5	0,9	1,5
• Arena gruesa	0,75	1,25	1,7
• Arena	0,75	1,5	2
• Migajón arcilloso	1	1,7	2,3
• Arcilla	1,5	1,8	2,1
• Grava gruesa	1,5	1,8	
• Tepetate,	1,8	2,1	
material consolidado			
• Material cementado	2,5		

Una vez escogido el valor de la velocidad máxima permisible de flujo, se realiza el cálculo de la sección mínima mediante la fórmula:

$$S = \frac{Q}{V_C} = 0,3441 \text{ m}^2$$

Entonces se escoge el diseño de la forma del canal de la terraza que corresponderá en éste caso a una sección transversal triangular. Tal y como se muestra en la Figura 19.

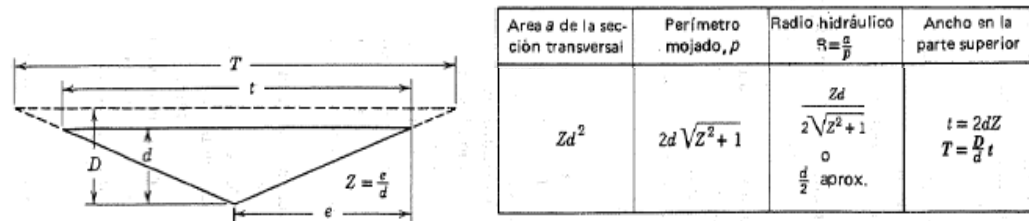
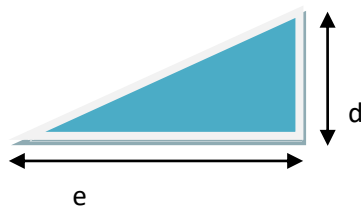


Figura 19: Datos canal de sección transversal triangular

Se propone  $Z=6,667$  que equivale a un 15% de pendiente.



$$\text{Área sección Transversal} = Z \cdot d^2 \rightarrow Z = 6,667$$

$$d = \sqrt{\frac{S}{Z}} = \sqrt{\frac{0,3441}{6,667}} = 0,227 \text{ m}$$

Una vez que se ha escogido y calculado las dimensiones para el tipo de canal deseado, se procede a escoger el valor del coeficiente de "n" de Manning que viene tabulado según el tipo de vegetación, véase Tabla 7 extraída de (Schwab et al. 1990).

Tabla 7: Valores coeficiente "n" de Manning según cubiertas

Muy lisa, vidrio, plástico, cobre.	0,010
Concreto muy liso.	0,011
Madera suave, metal, concreto frotachado.	0,013
Suelo desnudo	0,016
Canales de tierra en buenas condiciones.	0,017
Canales naturales de tierra, libres de vegetación.	0,020
Cub. vegetal muy alta (> 600mm) y densa	0,06 – 0,20
Cub. vegetal alta (250 - 600 mm)	0,04 – 0,15
Cub. vegetal media (150 - 200 mm)	0,03 – 0,08
Cub. vegetal corta (50 - 150 mm)	0,03 – 0,06
Cub. vegetal muy corta (< 50 mm)	0,02 – 0,04
Canales naturales con alguna vegetación y piedras esparcidas en el fondo	0,025
Canales naturales con abundante vegetación.	0,035
Arroyos de montaña con muchas piedras.	0,040



En el caso de estudio, se procede a elegir un valor “n” igual a 0,025, entre cubierta vegetal muy corta o canales naturales de tierra libre de vegetación. **n=0,025**

Se calcula el radio hidráulico **r** de la sección transversal triangular mediante fórmula:

$$r = \frac{Z \cdot d}{2 \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,1123 \text{ m}$$

Para seguir, es necesario realizar el cálculo de la velocidad máxima para el canal dimensionado, con el radio hidráulico (**r**), la pendiente (**s**) y valor de “n” de Manning:

$$v = \frac{r^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{n} = 0,589 \text{ m/s}$$

A fin de ver si el diseño del canal de la terraza es correcto, es necesario comparar el valor que hemos obtenido con **V** respecto a **V<sub>c</sub>**. La condición para cumplir es **V < V<sub>c</sub>**

Se compara **V (0,589m/s) < V<sub>c</sub> (0,6m/s)**. El cálculo para diseño del canal de la terraza cumple los requerimientos, en que la velocidad de circulación del agua por el canal diseñado será inferior a la velocidad máxima permisible.

Para finalizar, simplemente se tiene que volver a calcular el nuevo radio hidráulico “**r**” siempre asegurándose que no desborde, por ello se recomienda dar un margen de seguridad para la condición **V < V<sub>c</sub>** :

Se vuelve a calcular la sección mínima con el nuevo valor de **V**:

$$S = \frac{Q}{V} = 0,2064 / 0,589 = 0,350 \text{ m}^2$$

Se repite el cálculo del canal para sección triangular “**d**”:

$$d = \sqrt{\frac{S}{Z}} = \sqrt{\frac{0,350}{6,667}} = 0,229 \text{ m}$$



Se sigue con el mismo valor elegido en la Tabla 7 de “n” de Manning y se vuelve a calcular el nuevo radio hidráulico:

$$r = \frac{Z \cdot d}{2 \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,11338 \text{ m}$$

Se recalcula la velocidad máxima permitida de la misma manera que se ha realizado anteriormente.

$$v = \frac{r^{2/3} \cdot s^{1/2}}{n} = 0,5926 \text{ m/s}$$

Se verifica otra vez que cumple la condición de  $V < V_c$  y se le deja margen para que no desborde. Se le da un margen de seguridad de un 20% ( $d = 0,2290 + 0,046 = 0,2748 \text{ m}$ ). Por último, se calcula el ancho de la terraza mediante:

$$T = 2 \cdot D \cdot Z = 2 \cdot 0,2748 \cdot 6,667 = 3,664 \text{ m}$$

En este punto, se han calculado las dimensiones necesarias que deben disponer las terrazas de desagüe de la zona de estudio. Para poder terminar se tiene que calcular la capacidad del canal donde las terrazas desembocaran y dimensionarlo para que pueda soportar todo el caudal.

### **CÁLCULO DEL CANAL PRINCIPAL PARA DESEMBOCAR LAS TERRAZAS DE DESAGÜE**

Como punto de partida, se ha dividido la cuenca en tres tramos, uno superior con pendiente de 4 %, uno intermedio con una pendiente del 5 % y un tramo final con una pendiente de 6 % (véase Figura 20). Estos tramos tienen aproximadamente la misma longitud: en el tramo superior la longitud es de 360 m, en el segundo tramo es de 384 metros y en el tramo final es de 375 metros. Todo el canal principal, en el cual desembocaran las diferentes terrazas de desagüe, irá recubierto de vegetación.



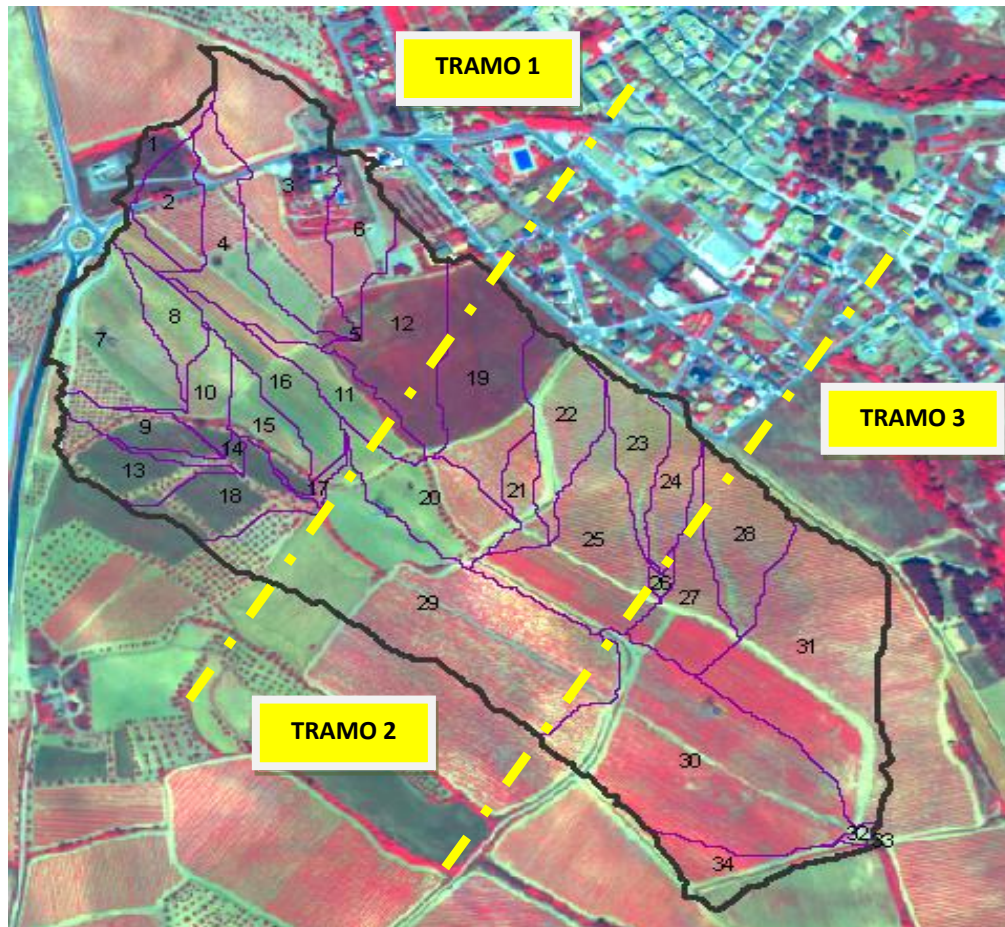


Figura 20: División de la cuenca en 3 sectores de acuerdo al grado de pendiente

- **TRAMO 1: SUPERIOR**

En primer lugar, cabe determinar el caudal a evacuar, teniendo en cuenta que la longitud del tramo 1 es de 360 m, y que la separación entre las terrazas de desagüe es de 24 m, en éste primer tramo nos desaguaran 15 terrazas.

Sabiendo que el caudal a desaguar por cada terraza es de  $0,206 \text{ m}^3/\text{s}$  según se ha calculado en la sección anterior.  $S = \text{pendiente del primer sector} = 4\% = 0,04$

A continuación, se procede a calcular el caudal que deberá desaguar el canal de sección trapezoidal con la siguiente fórmula:

$$Q = Q_{\text{terrazza}} \cdot \text{Número de terrazas a desaguar} = 0,206 \cdot 15 = 3,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

Seguidamente, se debe buscar en las Tablas la velocidad máxima permisible  $V_c$  (m/s) del flujo de agua que mejor se adapte. En el caso que nos aplica se acepta  $V_c = 1,8$  m/s que corresponde al valor de vegetación que se implantará en el tramo 1 de canal (Véase Tabla 8).

Una vez escogido el valor de la velocidad máxima permisible de flujo, se realiza el cálculo de la sección mínima mediante la fórmula:

$$S = \frac{Q}{V_c} = 1,716 \text{ m}^2$$

Entonces se escoge el diseño de la forma del canal que corresponderá, en éste caso, a una sección transversal trapezoidal. Tal y como se muestra en la Figura 21.

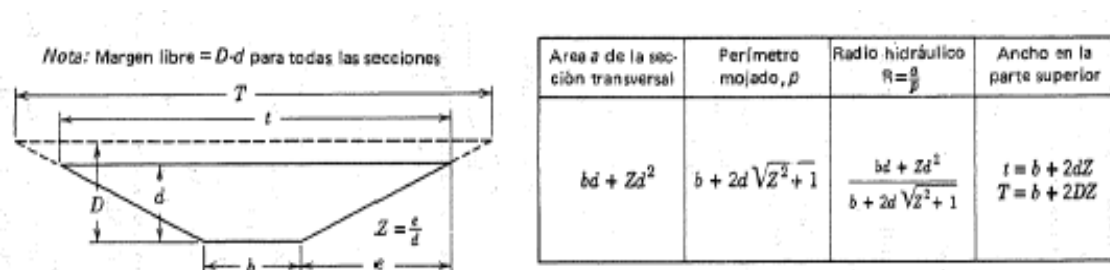
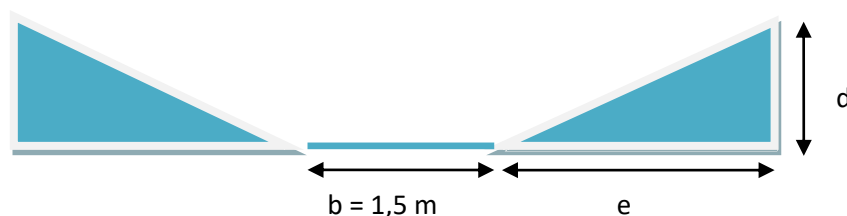


Figura 21: Datos canal de sección transversal trapezoidal.



Se propone una pendiente del 20%, que corresponde a un valor de  $Z = 5$ .

$$\text{Área sección Transversal} = b \cdot d + Z \cdot d^2 \rightarrow Z = 5$$

$$d = 0,536 \text{ m}$$

Una vez que se ha escogido y calculado las dimensiones para el tipo de canal que se requiere, se procede a escoger el valor del coeficiente de "n" de Manning que viene tabulado según el tipo de vegetación, véase Tabla 8 y 9, según proponen los autores (Schwab et al. 1990). El valor de "n" de Manning está en función del tipo de vegetación del canal. En el presente caso se elige las cubiertas festucas, gramas y bromo suave.

Tabla 8: Velocidades permisibles según tipos de cubiertas vegetales

Cubierta	Velocidades permisibles para suelos resistentes a la erosión (m/s) (pies/s).		
	Pendiente del canal en por ciento		
	0-5	5-10	Más de 10
Pasto Bermuda	2.4 (8) <sup>a</sup>	2.1 (7) <sup>a</sup>	1.8 (6) <sup>a</sup>
Gramma azul	2.1 (7) <sup>a</sup>	1.8 (6) <sup>a</sup>	1.5 (5) <sup>a</sup>
Pasto Búfalo			
Pasto azul de Kentucky			
Bromo suave			
Fescue alto			
Cultivos anuales para protección temporal	1.1 (3.5) <sup>b</sup>	NR <sup>c</sup>	NR
Alfalfa			
<i>Panicum sanguinale</i>			
Kudzu			
<i>Lespedeza sericea</i>			
<i>Eragrostis spp.</i>			
Mezcla de pastos	1.5 (5) <sup>b</sup>	1.2 (4) <sup>b</sup>	NR

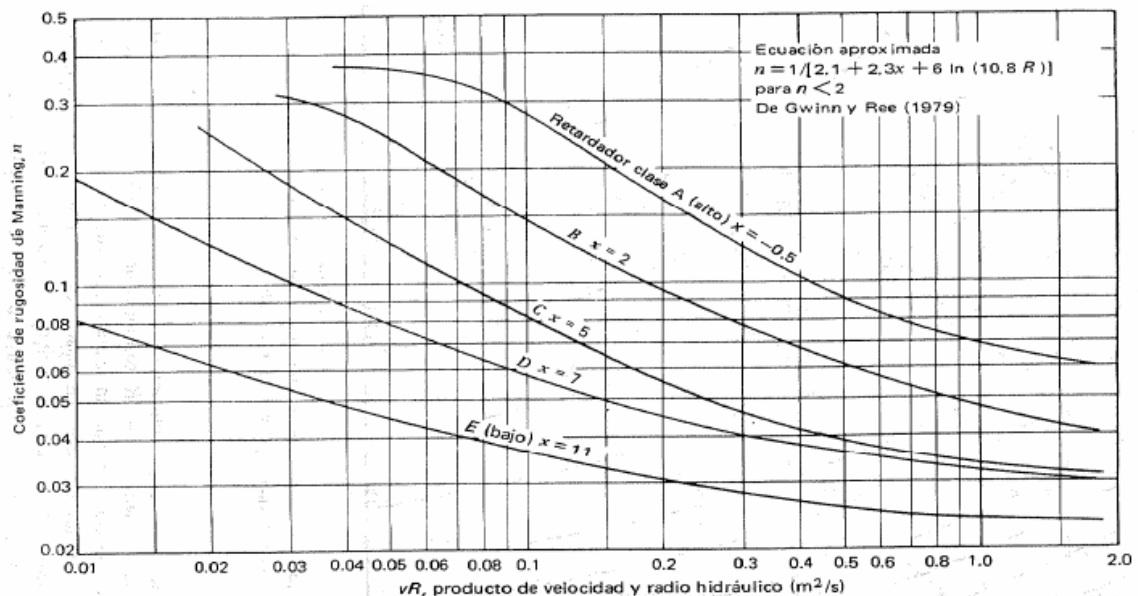
<sup>a</sup> Los suelos moderadamente resistentes reducen las velocidades en 0.3 m/s (1 pie/s). Los suelos fácilmente erosionables reducen las velocidades en 0.6 m/s (2 pies/s).

<sup>b</sup> Los suelos fácilmente erosionables reducen las velocidades en 0.3 m/s (1 pie/s).

<sup>c</sup> No recomendado.

Fuente: modificado de Ree (1949).

Tabla 9: Coeficiente de Manning según el producto de la velocidad por el R hidráulico



En éste caso, se procede a elegir un valor “n” igual a 0,062, con la cubierta tipo B **n=0,062**  
Se calcula el nuevo radio hidráulico **r** de la sección transversal trapezoidal mediante la fórmula:

$$r = \frac{b \cdot d + Z \cdot d^2}{b + 2d \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,2796 m$$

Para seguir, es necesario realizar el cálculo de la velocidad máxima permitida, con el radio hidráulico (**r**), la pendiente (**s**) y valor de “n” de Manning:

$$v = \frac{r^{2/3} \cdot s^{1/2}}{n} = 1,379 m/s$$

A fin de ver si el diseño del canal de la terraza es correcto, es necesario comparar el valor que se ha obtenido con **V** respecto a **V<sub>c</sub>**. La condición para cumplir es **V < V<sub>c</sub>**

Se compara **V (1,379 m/s) < V<sub>c</sub> (1,8m/s)**. El cálculo para diseño del canal de la terraza cumple.

Para finalizar simplemente se tiene que volver a calcular el nuevo radio hidráulico “**r**” y asegurándose que no desborde, siempre dando un margen de seguridad para la condición **V < V<sub>c</sub>**:

Se vuelve a calcular la sección mínima con el nuevo valor de **V**:

$$S = \frac{Q}{V} = 3,09 / 1,379 = 2,2399$$

Se repite el cálculo del canal para sección trapezoidal “**d**”:

$$d = 0,5359 m$$

Se sigue con el mismo valor elegido en la Tabla 7 de “n” de Manning y se recalcula el nuevo radio hidráulico:

$$r = \frac{b \cdot d + Z \cdot d^2}{b + 2d \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,3215 m$$

Se calcula la velocidad máxima permitida de la misma manera que se ha realizado anteriormente



$$v = \frac{r^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{n} = 1,514 \text{ m/s}$$

Se verifica otra vez que cumple la condición de  $V < V_c$  y se le deja margen para que no desborde. Se le da un margen de seguridad de un 20%, por tanto,  $D = 0.643 \text{ m}$ . Por último, se calcula el ancho de la terraza mediante:

$$T = b + 2 \cdot D \cdot Z = 1,5 + (2 \cdot 0,643 \cdot 5) = 7,93 \text{ m}$$

- **TRAMO 2: INTERMEDIO**

De forma análoga a los cálculos realizados para el tramo 1, en el presente tramo 2 de canal, se debe considerar que la longitud del mismo es de 384 m, con una pendiente del 5% y en él, aparte de recoger las aguas del primer tramo, desaguarán 16 terrazas.

A continuación, se calcula el tiempo de concentración ( $T_c$ ) con la siguiente fórmula:

Seguidamente se procede a obtener el cálculo del caudal a desaguar con la fórmula:

$$Q = (Q_{\text{Terraza}} \cdot \text{número de terrazas}) = (16 \times 0,2060) = 3,26 \text{ m}^3/\text{s}$$

En éste caso el caudal tiene que ser el resultado de la suma del caudal del tramo anterior  $Q_{\text{Tramo 1}} + \text{Caudal del Tramo 2}$ .

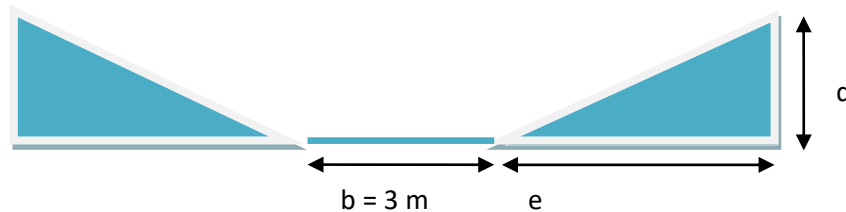
$$Q_{\text{TOTAL}} = Q_{\text{TRAMO1}} + Q_{\text{TRAMO2}} = 3,09 + 3,26 = 6,38 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, se busca en las Tablas la velocidad máxima permisible  $V_c$  (m/s) del flujo de agua que mejor se adapte. En nuestro caso, se acepta  $V_c = 1,8 \text{ m/s}$  que corresponde al valor entre grava gruesa y material consolidado para suelo desnudo (Véase Tabla 6).

Una vez escogido el valor de la velocidad máxima permisible de flujo, se realiza el cálculo de la sección mínima mediante la fórmula:

$$S = \frac{Q}{V_c} = 3,544$$

Entonces se escoge el diseño de la forma del canal que corresponda, al igual que en el tramo 1, a una sección transversal trapezoidal.



Se propone una pendiente del 15%, que corresponde a un valor de  $Z = 6,66$ .

$$\text{Área sección Transversal} = b \cdot d + Z \cdot d^2 \rightarrow Z = 6,66$$

$$d = 0,5384 \text{ m}$$

Una vez que se escoge y calcula las dimensiones para el tipo de canal que se necesita, se procede a escoger el valor del coeficiente de “n” de Manning que vienen tabulados según el tipo de vegetación B, (véase Tabla 8 y 9).

En éste caso, se procede a elegir un valor “n” igual a 0,062, entre canales naturales de tierra con cubierta vegetal corta o media. **n=0,062**

Se sigue calculando el nuevo radio hidráulico  $r$  de la sección transversal triangular mediante fórmula:

$$r = \frac{b \cdot d + Z \cdot d^2}{b + 2d \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,3458 \text{ m}$$

Para seguir, es necesario realizar el cálculo de la velocidad máxima permitida, con el radio hidráulico ( $r$ ), la pendiente ( $s$ ) y valor de “n” de Manning:

$$v = \frac{r^{2/3} \cdot s^{1/2}}{n} = 1,78 \text{ m/s}$$



A fin de ver si el diseño del canal de la terraza es correcto, es necesario comparar el valor que se ha obtenido con  $V$  respecto a  $V_c$ . La condición para cumplir es  $V < V_c$

Se compara  $V$  (**1,78 m/s**)  $< V_c$  (**1,8 m/s**). El cálculo para diseño del canal de la terraza cumple

Para finalizar simplemente se tiene que volver a calcular el nuevo radio hidráulico " $r$ " y asegurándose que no desborde, siempre se da un margen de seguridad para la condición  $V < V_c$ :

Se vuelve a calcular la sección mínima con el nuevo valor de  $V$ :

$$S = \frac{Q}{V} = 3,5939 \text{ m}^2$$

Se repite el cálculo del canal para sección trapezoidal " $d$ ":

$$d = 0,5429 \text{ m}$$

Se sigue con el mismo valor elegido en la Tabla 7 de " $n$ " de Manning y se vuelve a calcular el nuevo radio hidráulico:

$$r = \frac{b \cdot d + Z \cdot d^2}{b + 2d \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,3482 \text{ m}$$

Se vuelve a calcular la velocidad máxima permitida de la misma manera que se ha realizado anteriormente

$$v = \frac{r^{\frac{2}{3}} \cdot s^{\frac{1}{2}}}{n} = 1,79 \text{ m/s}$$

Se verifica otra vez que cumple la condición de  $V < V_c$  y se le deja margen del 20% para que no desborde ( $D = 0,6515 \text{ m}$ ) y por último, se calcula el ancho de la terraza mediante:

$$T = b + 2 \cdot D \cdot Z = 3 + (2 \cdot 0,6515 \cdot 6,667) = 11,68 \text{ m}$$





- **TRAMO 3: INFERIOR**

De la misma manera que en los dos tramos anteriores, se procede a determinar el caudal a desaguar para el último tramo. La longitud del mismo es de 375m y con una pendiente de 6%.

Seguidamente se obtiene el caudal a desagüe aportando las terrazas que desembocan en éste tramo 3.

$$Q = (Q_{\text{Terraza}} \cdot \text{número de terrazas}) = (15 \times 0,2060) = 3,09 \text{ m}^3/\text{s}$$

En éste caso, el caudal tiene que ser el resultado de la suma del caudal del tramo anterior  $Q_{\text{Tramo 2}} + \text{Caudal del Tramo 3}$ .

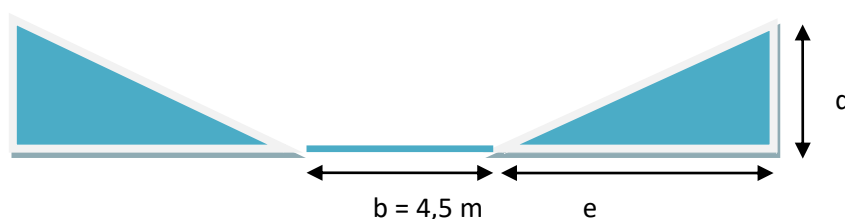
$$Q_{\text{TOTAL}} = Q_{\text{TRAMO 2}} + Q_{\text{terrazas TRAMO 3}} = 6,38 + 3,09 = 9,68 \text{ m}^3/\text{s}$$

A continuación, hay que buscar en las Tablas la velocidad máxima permisible  $V_c$  (m/s) del flujo de agua que mejor se adapte. En el presente caso, se acepta  $V_c = 2,1$  m/s que corresponde de la vegetación de canal Pasto Bermuda. (Véase Tabla 8 y 9).

Una vez se escoge el valor de la velocidad máxima permisible de flujo, se realiza el cálculo de la sección mínima mediante la fórmula:

$$S = \frac{Q}{V_c} = 9,68 \text{ m}^2$$

Entonces se escoge el diseño de la forma del canal que corresponderá, al igual que en el tramo 1 y 2, a una sección transversal trapezoidal.





$$\text{Área sección Transversal} = b \cdot d + Z \cdot d^2 \rightarrow Z = 6,667$$

$$d = 0,5599 m$$

Una vez que se ha escogido y calculado las dimensiones para el tipo de canal que queremos, se procede a escoger el valor del coeficiente de “n” de Manning que viene tabulado según el tipo de vegetación, véase Tabla 8 y 9.

Se procede a elegir un valor “n” igual a 0,065, entre canales naturales de tierra con cubierta vegetal corta o media. **n=0,065**

Se calcula el nuevo radio hidráulico **r** de la sección transversal trapezoidal mediante fórmula:

$$r = \frac{b \cdot d + Z \cdot d^2}{b + 2d \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,3826 m$$

Para seguir, es necesario realizar el cálculo de la velocidad máxima permitida, con el radio hidráulico (r), la pendiente (s) y valor de “n” de Manning:

$$v = \frac{r^{2/3} \cdot s^{1/2}}{n} = 1,99 m/s$$

A fin de ver si el diseño del canal de la terraza es correcto, es necesario comparar el valor que se ha obtenido con V respecto a  $V_c$ . La condición para cumplir es  $V < V_c$

Se compara  **$V_c$  (1,99 m/s) <  $V_c$  (2,1 m/s).**

El cálculo para diseño del canal de la terraza cumple

Para finalizar simplemente se tiene que volver a calcular el nuevo radio hidráulico “r” y asegurándose que no desborde, siempre dar un margen de seguridad para la condición  $V < V_c$  :

Se vuelve a calcular la sección mínima con el nuevo valor de V:

$$S = \frac{Q}{V} = 4,8748$$



Se repite el cálculo del canal para sección trapezoidal “d”:

$$d = 0,5818 \text{ m}$$

Se sigue con el mismo valor elegido en la Tabla 7 de “n” de Manning y se calcula el nuevo radio hidráulico:

$$r = \frac{b \cdot d + Z \cdot d^2}{b + 2d \cdot \sqrt{Z^2 + 1}} = 0,3949 \text{ m}$$

Se recalcula la velocidad máxima permitida de la misma manera que se ha realizado anteriormente.

$$v = \frac{r^{2/3} \cdot s^{1/2}}{n} = 2,03 \text{ m/s}$$

Se verifica otra vez que cumple la condición de  $V < V_c$  y se le deja margen para que no desborde ( $D=0,6981\text{m}$ ) y por último, se calcula el ancho de la terraza mediante:

$$T = b + 2 \cdot D \cdot Z = 4,5 + (2 \cdot 0,6981 \cdot 6,667) = 13,80 \text{ m}$$

- **RESUMEN DE LAS DIMENSIONES DE LAS TERRAZAS Y EL CANAL DE DESAGÜE**

A continuación, a modo de resumen, en la Tabla 10, se presentan los valores el dimensionado de las terrazas de desagüe, y los tres tramos de canal principal de desagüe.

Las diferentes variables mostradas son la sección mínima, el radio hidráulico, la profundidad, la anchura de las terrazas y el canal.

Tabla 10: Resumen de variables de dimensionado

VARIABLES	TERRAZAS DE DESAGÜE	CANAL DE DESAGÜE		
		TRAMO 1	TRAMO 2	TRAMO 3
<b>Caudal a desaguar Q</b>	0,2064 $m^3/s$	3,09 $m^3/s$	6,38 $m^3/s$	9,68 $m^3/s$
<b>Sección mínima S</b>	0,350	2,239	3,59	4,87
<b>Radio hidráulico r</b>	0,11338 m	0,3215 m	0,3482 m	0,3949 m
<b>Profundidad D</b>	0,229 m	0,643 m	0,6515 m	0,6981 m
<b>Anchura T</b>	3,663 m	7,93 m	11,68 m	13,80 m

En la siguiente Figura 21, se muestra a modo de esquema la representación de las medidas de conservación de las terrazas de desagüe, tal y como está previsto su diseño según los cálculos anteriormente detallados y el punto de desagüe general de la cuenca.

Delimitado en azul, se encuentra la parcela de viñedos dónde se procederá a realizar la actuación.

El punto de desagüe de la cuenca de estudio, se encuentra en la parte inferior del tramo 3 del canal de desagüe dimensionado, éste a su vez, desemboca a un canal que conecta con un barranco.

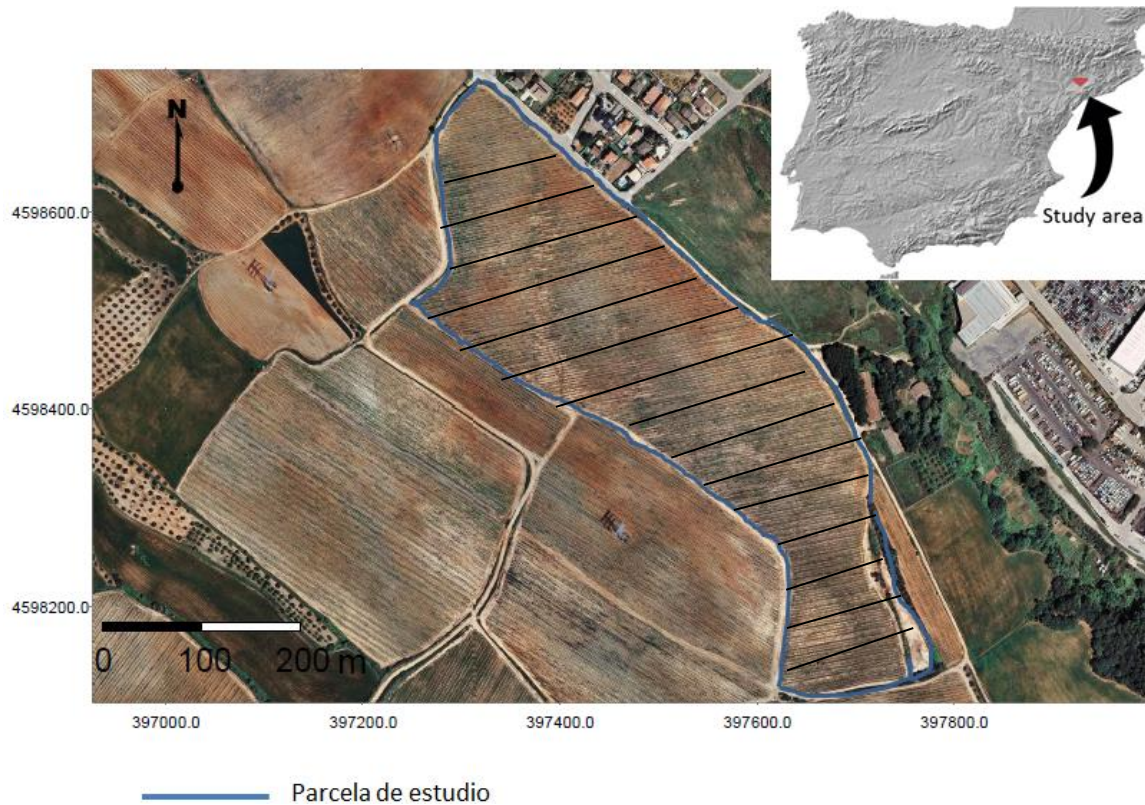


Figura 22: Esquema del diseño de las terrazas de desagüe

### 5.3.2. DISEÑO DE LAS FRANJAS DE VEGETACIÓN

Dada la disposición del cultivo en la viña, con un marco de plantación de 3m x 3m, se ha pensado que la una opción viable podría ser implantar bandas de vegetación de una anchura de 3m en filas alternas. Las variedades seleccionadas para realizar la cubierta vegetal son las gramíneas cespitosas que proporcionan una mayor rugosidad ya que por su morfología tienden a formar una cubierta densa desde la base. Se ha tomado el mismo criterio para la vegetación del canal principal de desagüe (Schawb, 1993). Se proponen las siguientes especies de la familia de las gramíneas:

***Festuca elatior* variedad *arundinacea*:** planta perenne de 45 -180 cm y cespitosa, de la familia de las gramíneas. Hojas con el limbo plano y nervios salientes, de hasta 1 cm de anchura, liguladas y con aurículas ciliadas, abrazadoras. Es una planta que crea una cubierta densa, una vez germinada soporta bien el pisoteo o paso de maquinaria y se mantiene verde incluso en verano. El inconveniente de esta especie es que necesita buenas condiciones para su nacencia.

Adaptación a condiciones climáticas y edáficas muy diversas. Buena tolerancia al frío, al calor y a la sequía. Persistencia elevada, superando los 5 años.

***Lolium perenne* (ray-grass):** planta perenne de 10-80 cm, cespitosa, con los tallos lisos. Hoja con lígula membranosa de hasta 2 mm y aurículas, la vaina basal generalmente rojiza cuando es joven. Fácil de establecer y de desarrollo precoz, soporta peor el pisoteo que *Festuca* pero germina más fácilmente, incluso en condiciones menos idóneas. Climas templado-húmedos, tolera el frío moderado, pero es sensible al calor y a la sequía. Su crecimiento se ralentiza a partir de los 25 °C y se paraliza a los 35 °C. Se adapta a un amplio rango de suelos Persistencia de 4-5 años o más si las condiciones de medio son favorables.

Cubierta vegetal se compondrá en un 90% de una de estas especies de gramíneas y un 10% de una leguminosa.

***Trifolium subterraneum*** planta anual de la familia de las leguminosas, de 20-30 cm, pelosa, con pelos largos. Tallos tendidos. Hojas trifoliadas. Se implanta con cierta dificultad y su crecimiento otoñal es escaso. Presenta una buena capacidad de autosiembra (enterramiento de la semilla, alto porcentaje de dureza seminal que evita germinaciones precoces...). Sin embargo, existe una importante variabilidad anual en la cantidad y calidad de semilla producida que depende de la humedad disponible desde el comienzo de la floración. Sus requerimientos ambientales son áreas mediterráneas. Se desarrolla en climas de invierno suave y pluviometría de 350-750 mm anuales.

Entre las dos especies de gramíneas, la *Festuca elatior* variedad *arundinacea* y *Lolium perenne* debido a crecimiento inicial lento y vulnerable de la *Festuca* y su susceptibilidad a la competencia de especies más agresivas, como los raigrases, *Lolium perenne*, hay que escoger entre una de las dos especies.

## 6. APLICACIÓN DE LAS MEDIDAS PROPUESTAS MEDIANTE EL MODELO SWAT

A continuación, se muestra la introducción de datos necesarios para la simulación mediante SWAT de la aplicación de las diferentes medidas de conservación de suelo propuestas, así como la simulación del estado actual de la cuenca.

SWAT extrae la información para poder ejecutar las diferentes simulaciones de bases de datos que son comunes para cualquiera de los apartados siguientes, con medidas de conservación aplicadas o sin ellas. Solamente se muestra unos ejemplos de algunas de las bases de datos que se modifican para la simulación de las diferentes medidas. Existe una enorme cantidad de parámetros que maneja el modelo.

- **PARÁMETROS SIMULACIÓN SITUACIÓN ACTUAL**

Para proceder a simular el estado actual de la cuenca de estudio, se han tenido que implementar diferentes bases de datos de la cuales se alimenta SWAT, referentes a históricos climáticos, de los diferentes tipos de suelo en sus diferentes horizontes (hasta 3 horizontes), de los distintos cultivos que están implantados en la cuenca, de las fertilizaciones que se realizan en cada cultivo, entre otros. La Figura 23 muestra un ejemplo del tipo de información que incluye la base de suelos (**User Soils Edits**), información de diferentes propiedades de cada uno de los horizontes.

En la simulación del estado actual hay que forzar que los valores de USLE\_P sean igual a 1 y el de FILTER W igual a 0. Más adelante se detallarán en la Figura 29 dónde poder modificarlos y su significado.

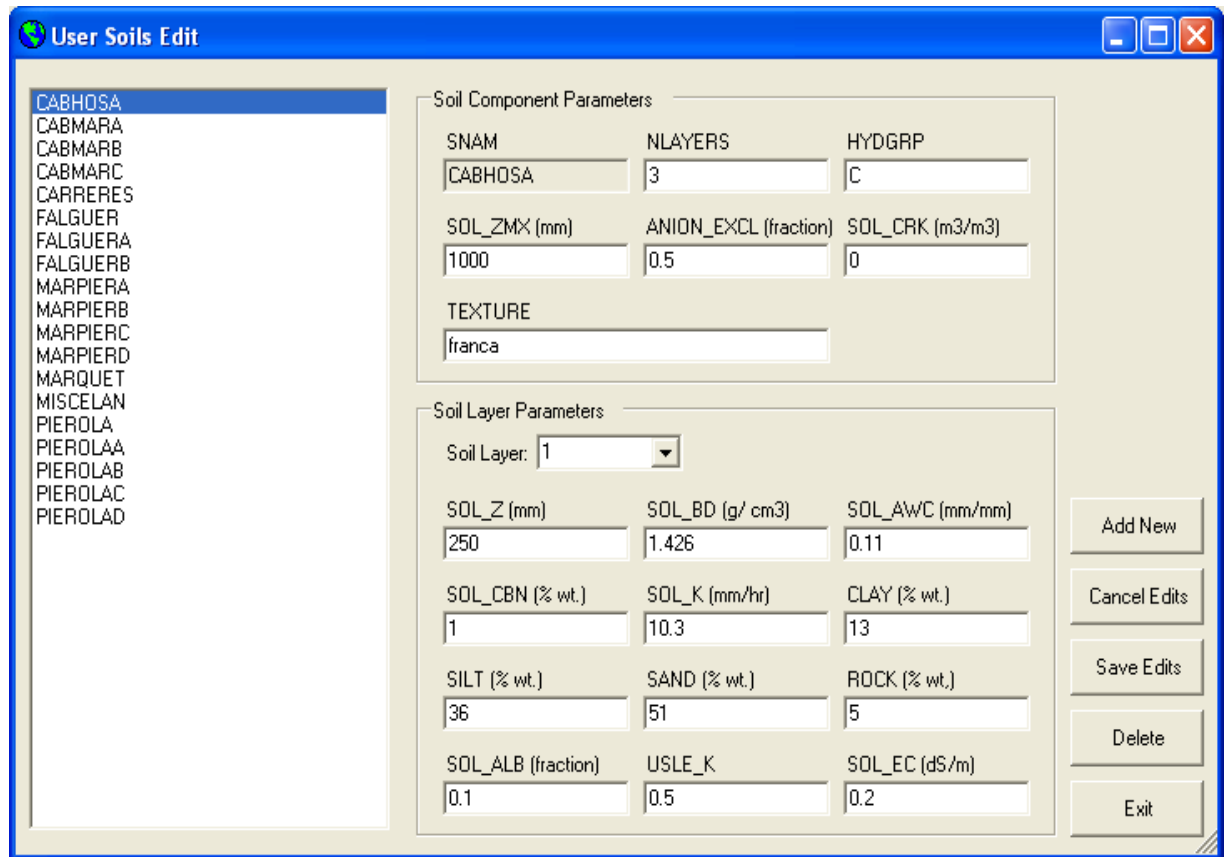
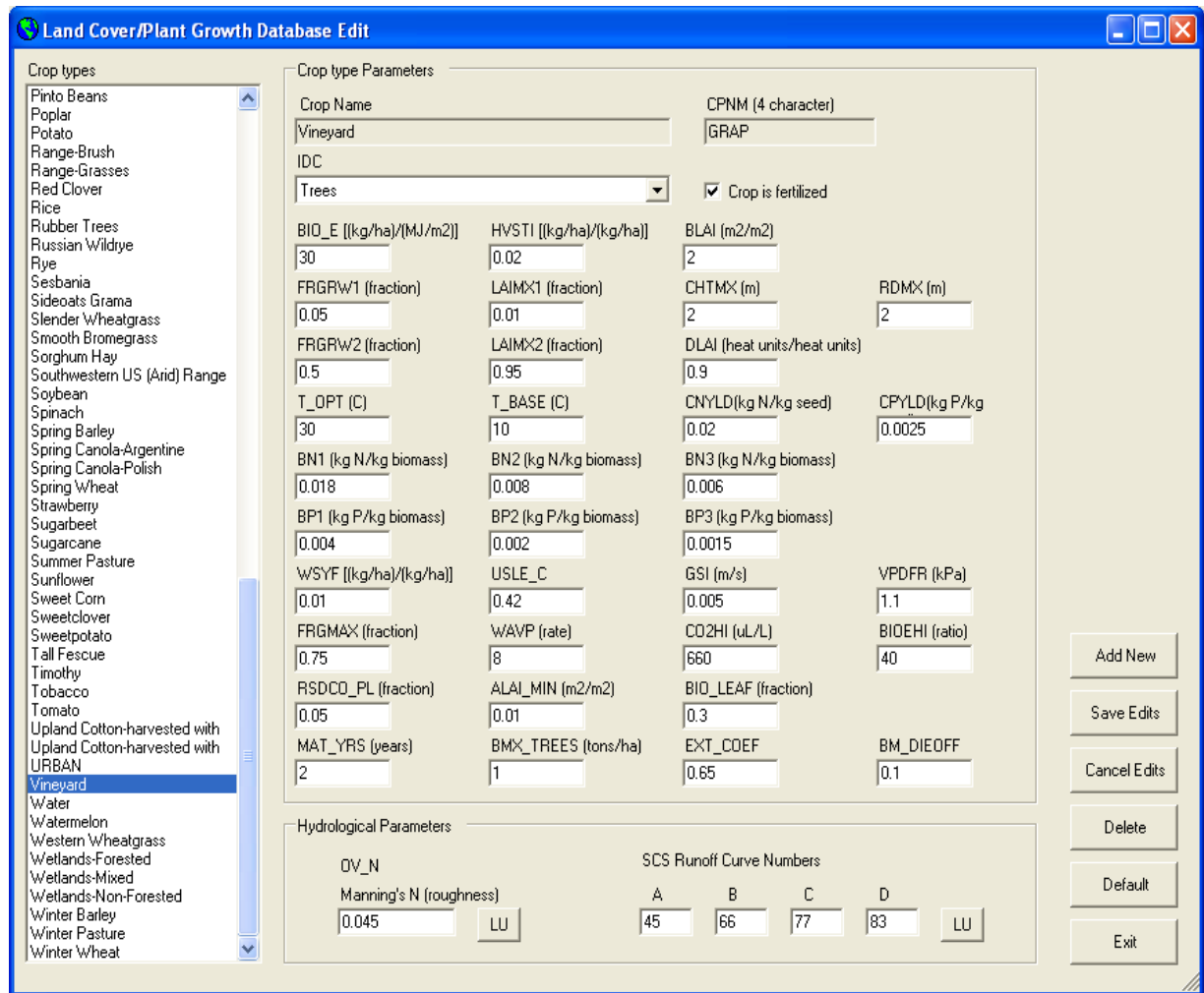


Figura 23: Base de datos SWAT para agrupaciones de series de suelo

En la Figura 24, muestra el tipo de información que incluye la base de datos referente a los cultivos (**Land Cover/Plant Growth Database**). En ella se puede modificar datos como:

- BIO\_E (eficiencia del uso de la radiación del cultivo)
- LAIMX1 (máximo del índice de área foliar del cultivo)
- T\_OPT (Temperatura óptima para el crecimiento del cultivo)
- T\_BASE (Temperatura base para el crecimiento del cultivo)



**Land Cover/Plant Growth Database Edit**

**Crop types**

- Pinto Beans
- Poplar
- Potato
- Range-Brush
- Range-Grasses
- Red Clover
- Rice
- Rubber Trees
- Russian Wildrye
- Rye
- Sesbania
- Sideoats Grama
- Slender Wheatgrass
- Smooth Bromegrass
- Sorghum Hay
- Southwestern US (Arid) Range
- Soybean
- Spinach
- Spring Barley
- Spring Canola-Argentine
- Spring Canola-Polish
- Spring Wheat
- Strawberry
- Sugarbeet
- Sugarcane
- Summer Pasture
- Sunflower
- Sweet Corn
- Sweetclover
- Sweetpotato
- Tall Fescue
- Timothy
- Tobacco
- Tomato
- Upland Cotton-harvested with
- Upland Cotton-harvested with
- URBAN
- Vineyard**
- Water
- Watermelon
- Western Wheatgrass
- Wetlands-Forested
- Wetlands-Mixed
- Wetlands-Non-Forested
- Winter Barley
- Winter Pasture
- Winter Wheat

**Crop Parameters**

Crop Name: Vineyard CPNM (4 character): GRAP

IDC: Trees ☒ Crop is fertilized

BID\_E [(kg/ha)/(MJ/m2)]: 30 HVSTI [(kg/ha)/(kg/ha)]: 0.02 BLAI (m2/m2): 2

FRGRW1 (fraction): 0.05 LAIMX1 (fraction): 0.01 CHTMX (m): 2 RDMX (m): 2

FRGRW2 (fraction): 0.5 LAIMX2 (fraction): 0.95 DLAI (heat units/heat units): 0.9

T\_OPT (C): 30 T\_BASE (C): 10 CNYLD(kg N/kg seed): 0.02 CPYLD(kg P/kg): 0.0025

BN1 (kg N/kg biomass): 0.018 BN2 (kg N/kg biomass): 0.008 BN3 (kg N/kg biomass): 0.006

BP1 (kg P/kg biomass): 0.004 BP2 (kg P/kg biomass): 0.002 BP3 (kg P/kg biomass): 0.0015

WSYF [(kg/ha)/(kg/ha)]: 0.01 USLE\_C: 0.42 GSI (m/s): 0.005 VPDFR (kPa): 1.1

FRGMAX (fraction): 0.75 WAVP (rate): 8 CO2HI (uL/L): 660 BIOEHI (ratio): 40

RSDCO\_PL (fraction): 0.05 ALAI\_MIN (m2/m2): 0.01 BIO\_LEAF (fraction): 0.3

MAT\_YRS (years): 2 BMX\_TREES (tons/ha): 1 EXT\_COEF: 0.65 BM\_DIEOFF: 0.1

**Hydrological Parameters**

QV\_N: 0.045 Manning's N (roughness): LU

SCS Runoff Curve Numbers: A: 45 B: 66 C: 77 D: 83 LU

Buttons: Add New, Save Edits, Cancel Edits, Delete, Default, Exit

Figura 24: Base de datos SWAT para cultivos

En la Figura 25 se muestra la información referente a los tipos de fertilizantes usados en la cuenca y sus principales características (**Fertilizer Database Edit**. Dicha información se especifica para cada cultivo y son susceptibles de cambio parámetros tales como:

- FMINN (Fracción de nitrógeno mineral en el fertilizante)
- FMINP (Fracción de fósforo mineral en el fertilizante)
- BACTPDB (concentración de bacterias persistentes en el fertilizante)



**Fertilizer Database Edit**

**Fertilizers**

- 26-13-00
- 28-03-00
- 28-10-10
- 30-15-00
- 30-80-00
- 31-13-00
- 33-00-00
- 46-00-00
- Anhydrous Ammonia
- Beef-Fresh Manure
- Broiler-Fresh Manure
- Dairy-Fresh Manure
- Duck-Fresh Manure
- Elemental Nitrogen
- Elemental Phosphorous
- Goat-Fresh Manure
- Horse-Fresh Manure
- Layer-Fresh Manure
- Sheep-Fresh Manure
- Swine-Fresh Manure
- Turkey-Fresh Manure
- Urea
- Veal-Fresh Manure
- x08-15-15
- x20-08-14
- x25-15-40
- xCompost\_bovino**

**Fertilizer Parameters**

Fertilizer Name: xCompost\_bovino

FERTNM (8 character): Compost

FMINN (kg min N/kg fertilizer): 0.005

FMINP (kg min P/kg fertilizer): 0.007

FORGN (kg org N/kg fertilizer): 0.015

FORGP (kg org P/kg fertilizer): 0.01

FNH3N (kg NH3 N/kg min N): 0.99

☒ Is Manure

BACTPDB (# cfu/g manure): 0

BACTLPDB (# cfu/g manure): 0

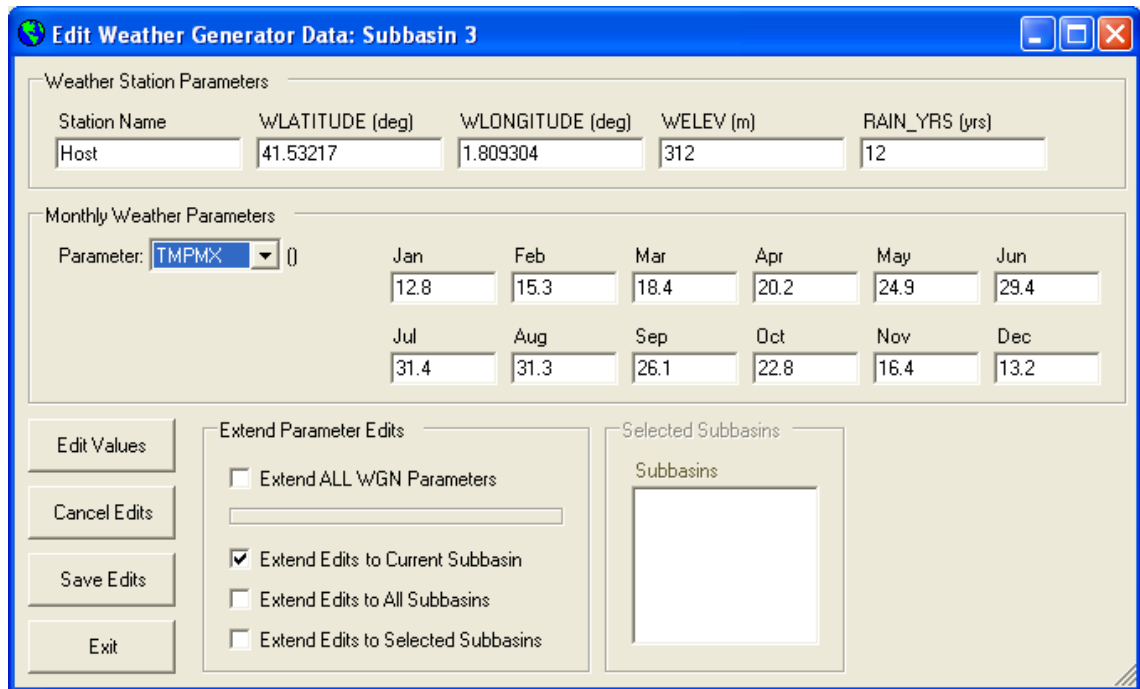
BACTFDDB (fraction): 0

BACTFDDDB (fraction): 0

Buttons: Add New, Save Edits, Cancel Edits, Delete, Default, Exit

Figura 25: Base de datos SWAT para fertilización de cultivos

Otro ejemplo de base de datos de las cuales SWAT extrae la información para realizar las simulaciones es la climatológica (**Edit Weather Generator Data**). En este caso los datos de entrada se tomaron de la estación de Els Hostalets de Pierola. (Véase Figura 26 y Tabla 1). Los datos de entrada incluyen datos diarios de temperatura máxima y mínima, precipitación, radiación solar, humedad relativa y velocidad de viento . Además, se introducen datos medios mensuales de una serie de 15 años de las mismas variables y a parte de datos de temperatura de punto de rocío, precipitación máxima, intensidad de lluvia máxima en 30 minutos, y de distribución de la lluvia (Skewness y Curtosis).



Weather Station Parameters				
Station Name	WLATITUDE (deg)	WLONGITUDE (deg)	WELEV (m)	RAIN_YRS (yrs)
Host	41.53217	1.809304	312	12

Monthly Weather Parameters						
Parameter: TMPMX	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun
	12.8	15.3	18.4	20.2	24.9	29.4
Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
31.4	31.3	26.1	22.8	16.4	13.2	

Figura 26: Base de datos SWAT para climatología.

- **PARÁMETROS SIMULACIÓN TERRAZAS DE DESAGÜE**

La simulación de las terrazas de desagüe se realiza en el menú **Edit Management Parameters**. Se escoge una subcuenca donde el cultivo sea vid y se desplegará el siguiente cuadro de diálogo (Figura 27), donde en la pestaña correspondiente a **Operations** se mostrará el manejo que existe para aquella subcuenca seleccionada. Entonces se puede añadir en **Add Operation**, una operación en el siguiente cuadro se seleccionará en función de lo que se quiera implementar (véase Figura 28). Se ha utilizado conjuntamente la implementación de terrazas y la vegetación del canal de desagüe.

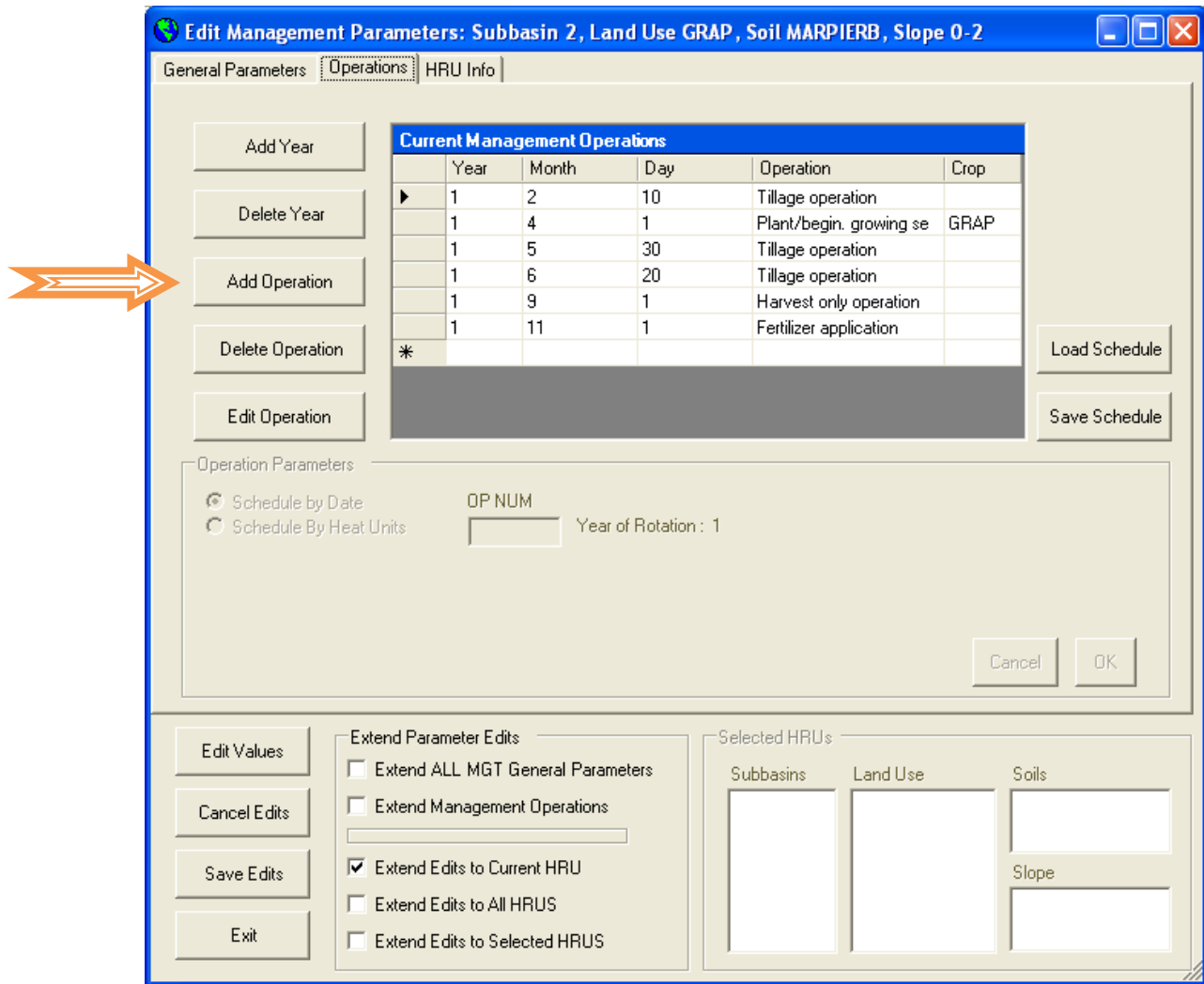


Figura 27: Cuadro de diálogo de SWAT

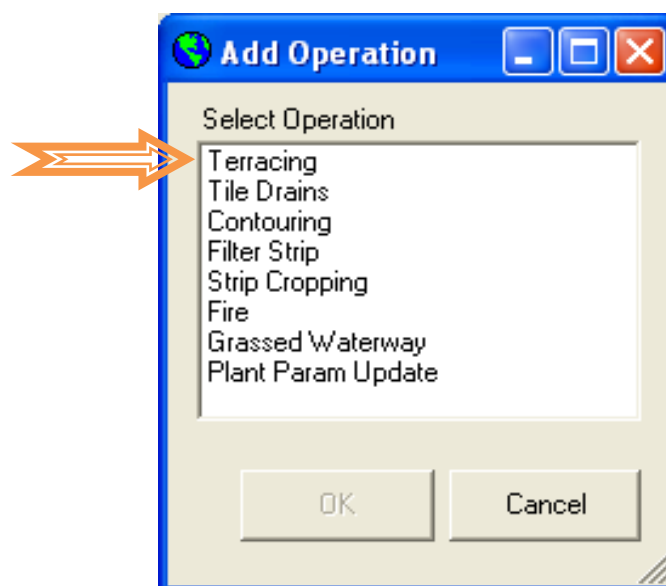


Figura 28: Cuadro de diálogo de selección de operaciones en SWAT

En el cuadro de *Add Operations* se seleccionaría la operación de **Terracing** y se aceptaría. A continuación, se cargaría en el cuadro de diálogo principal la opción de terrazas tal y como se muestra en la Figura 29 y se tendría que poner en el apartado de **Operation details** (detalle de las operaciones), la fecha con que se quiere que se aplique la opción de terrazas en las simulaciones. En el caso que se muestra, en las simulaciones que sean a partir del día 1 de Enero de 1998. Para la simulación en el presente caso de estudio se puso la fecha de **1 Enero de 2000**.

- **PARÁMETROS SIMULACIÓN GRASSED WATERWAYS**

De manera análoga a como se imponía en el modelo las terrazas de desagüe, en la Figura 28, se dispone de la opción de marcar **Grassed waterway** y así poder realizar la simulación con SWAT del efecto que tendría frente a la erosión si en canal principal de desagüe estuviese vegetado.

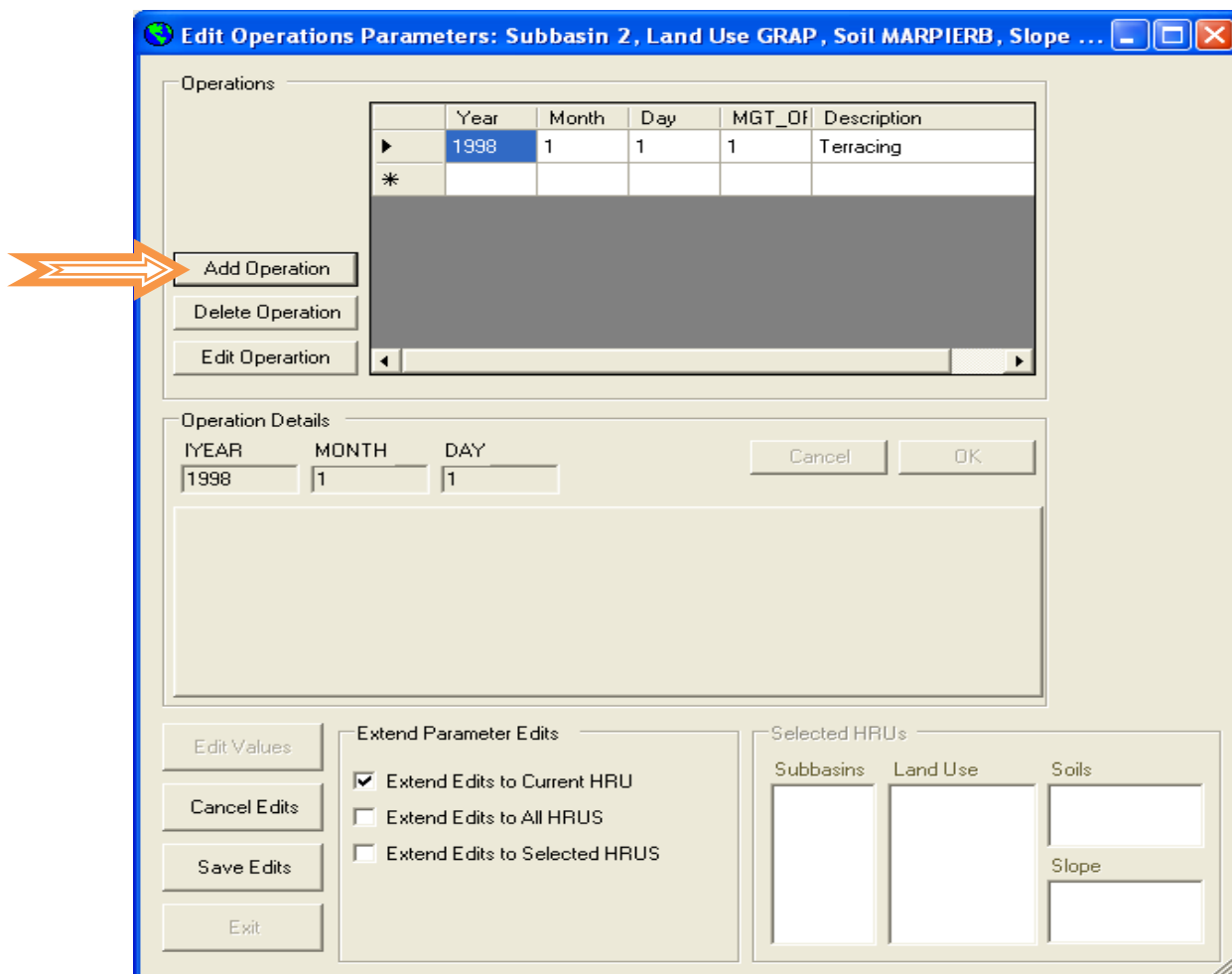


Figura 29: Cuadro de diálogo de SWAT con terrazas aplicadas



Por último, a fin de aplicar esta medida a todas las subcuencas que contengan como cultivo vid, es necesario que en el apartado de **Extend Parameter Edits**, se seleccione **Extend Edits to selected HRUS. Subbasins**, seleccionando el número de las subcuencas que, en éste estudio, quedan en la cuenca derecha, y en la opción de **Land Use** se seleccione **Grape**.

Después de añadir la operación de manejo de terrazas, es necesario cambiar ciertos valores de otras bases del programa como el valor de la USLE\_P de las terrazas.

Las siglas de la USLE\_P, proviene de la ecuación universal de la pérdida de suelos, ya que el programa SWAT calcula los sedimentos a partir de esta ecuación:

$$Sedimentos = 1,292 \cdot EI_{USLE} \cdot K_{USLE} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

$EI_{USLE}$  = Factor de erosividad de la lluvia.

$K_{USLE}$  = Factor de erosionabilidad del suelo.

$C_{USLE}$  = Factor de manejo de cubiertas.

$P_{USLE}$  = Factor de prácticas de conservación

$LS_{USLE}$  = Factor topográfico.

$CFRG$  = factor de fragmentos gruesos

Se debe modificar el valor de la USLE\_P con 0,5 cuando se aplican las Terrazas de desagüe, en cambio, para simular el estado actual de cuenca de estudio sin ningún tipo de actuación es necesario marcar con el valor de USLE\_P con 1. Éstos valores se modifican en el menú de **Edit Management Parameters** en la pestaña de **General Parameters** (véase Figura 30). Otros parámetros que también se modifican es el número de curva (CN). Dicho valor se rebaja en un 5%.

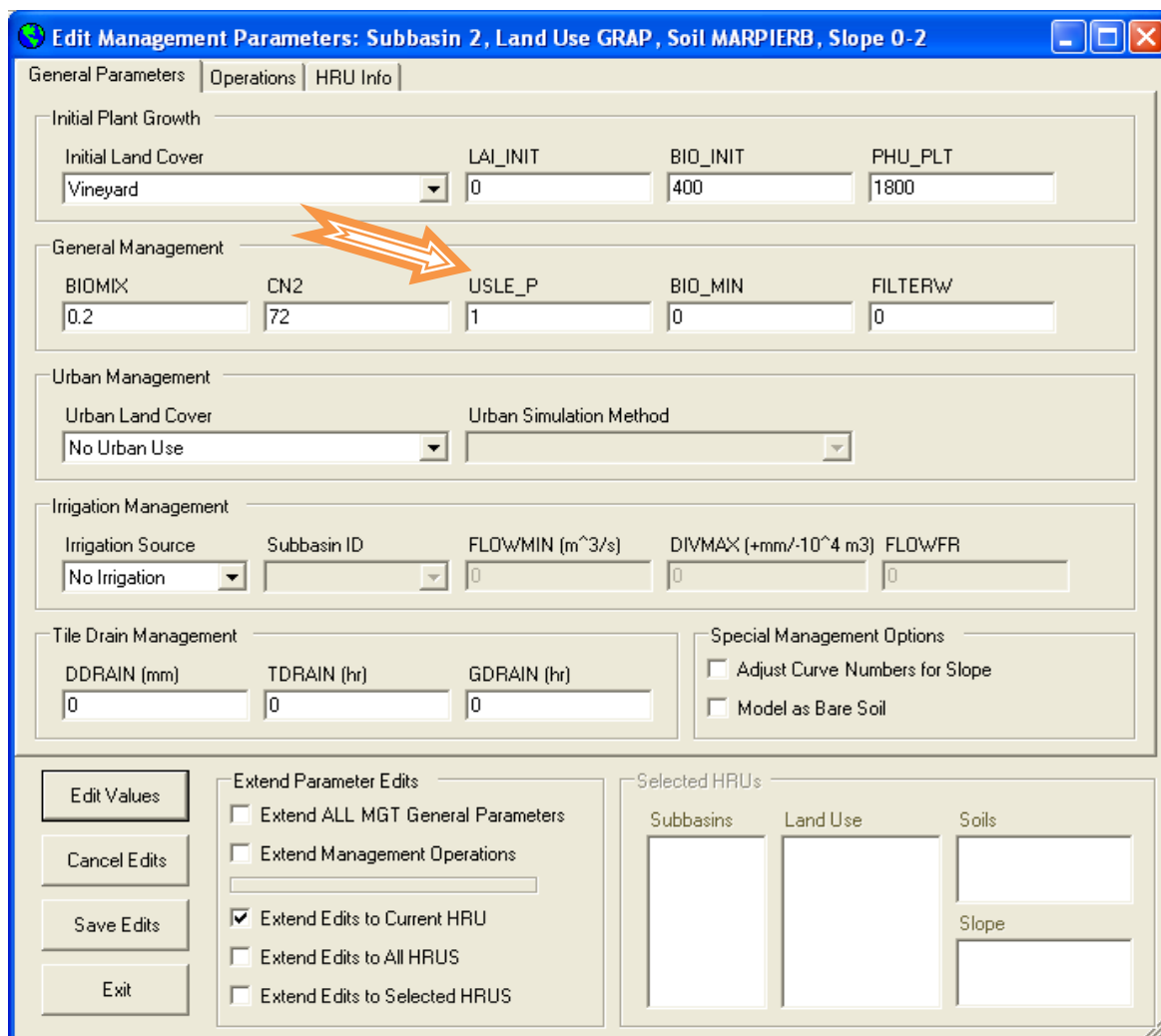


Figura 30: Cuadro de diálogo de parámetros generales SWAT.

## • PARÁMETROS SIMULACIÓN FRANJAS DE VEGETACIÓN

De la misma manera que se ha realizado la selección de la medida de conservación de terrazas de desagüe, en el cuadro de diálogo de selección de operaciones (Figura 27) **add operations**, aparece la opción de “Filter Strip” (Figura 28) que corresponde a la medida alternativa escogida de franjas de vegetación.

Una vez se selecciona la opción de “**Filter Strip**”, se debe indicar a partir de qué fecha se impone ésta medida en la simulación, tal y como se realizó con las terrazas, en el apartado **Operations details**. Para guardar la medida, se debe actuar de la misma manera que se indicó en las terrazas en la selección de **Extend Parameters Edits**.



Igual que en el caso anterior, también se debe modificar el valor de USLE\_P con 1 cuando se pretende simular la aplicación de franjas de vegetación.

A parte de modificar el valor de USLE\_P, es necesario que en el parámetro de Filter\_W del **Edit Management Parameters** en la pestaña de **General Parameters** (véase Figura 30) se modifique con el valor de la anchura que se desee para las franjas de vegetación que se quiere implantar en el cultivo de la vid. El valor del Filter\_W será igual a 3, ya que como se ha indicado anteriormente se proponen franjas de vegetación entre las filas del viñedo de forma alterna. La distancia entre hileras en la plantación de vid existente en la cuenca de estudio es de 3 metros.

- **PARÁMETROS SIMULACIÓN FRANJAS DE VEGETACIÓN + “FILTER STRIP”**

Para poder aplicar la simulación del último escenario escogido, es necesario forzar el valor de USLE\_P a 0,5 ya que se implantan Terrazas de desagüe y también en **Edit Management Parameters** en la pestaña de **General Parameters** se indicará Filter W 3. Como se puede observar, éste escenario es la combinación de los dos anteriores.

## **7. ANÁLISIS DE PÉRDIDAS DE SUELO Y NUTRIENTES ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN.**

### **7.1. CARACTERIZACIÓN DE LAS PRECIPITACIONES DE LA ZONA DURANTE EL PERIODO ANALIZADO**

Dado que las precipitaciones son el mayor agente de erosión, se procederá a realizar una caracterización de las precipitaciones que han tenido lugar en la zona de estudio, mediante los datos registrados en la estación más cercana y por el período de estudiado en el presente trabajo (2000-2011) véase Figura 31. Las Figuras 32 a 43 muestran la precipitación anual de todos los años analizados. Los datos corresponden a la estación meteorológica de Els Hostalets de Pierola durante el período de estudio (2000-2011). Se puede observar que el volumen de precipitación caído durante los años 2000-2011 es muy irregular. A lo largo del período se han registrado tanto años con una precipitación muy baja, como en el caso de 2005 y 2006 y años muy húmedos, como es el caso de los años 2004, 2008, 2010 y 2011, en los que el volumen de precipitación registrado acumulado se mantuvo alrededor de 700 mm.

En cambio, los años 2000, 2003 y 2009 corresponden a una precipitación media. En cuanto a la distribución de la lluvia a lo largo del año, también se encuentra gran variabilidad. Las Figuras 36, 37, 31, 34, 35, 39, representan algunos de las situaciones más extremas en cuanto a la distribución de la lluvia anual correspondiente a los años más secos, más húmedos y de precipitación media.

Se observa que en el caso del 2005 en la Figura 37, estas lluvias se concentran básicamente en dos meses, octubre y noviembre, con precipitaciones acumuladas de entre 80 a 100 mm, mientras que el resto de los meses del año, la precipitación acumulada es muy pequeña 20 mm o prácticamente nula.

Pasando a analizar el año 2006, Figura 37, se comprueba que no coincide la distribución de las precipitaciones con el año 2005, a pesar de que los dos se encuentran dentro de los años con poca precipitación. Toda la precipitación del año 2006 se registró en el mes de enero, dando lugar a una acumulación de lluvias de casi 150 mm, mientras que el resto de los meses, la precipitación fue nula o muy baja.

En los años más húmedos del período, 2004, 2008, 2010 y 2011, se puede observar que la distribución y el volumen de las lluvias fueron diferentes para cada uno de los años. El año



2004, se caracterizó por ser muy húmedo y la precipitación se distribuyó bastante uniformemente entre todos sus meses a excepción del mes de enero.

En 2008, sin embargo, a pesar de ser un año húmedo no se registró la regularidad observada en 2004. Hubo 3 meses (mayo, junio y octubre) en los que el volumen de precipitación fue de 100 mm. El resto de los meses mostraron precipitaciones cercanas a los 50 mm, menos enero, marzo, julio y agosto, donde la precipitación es muy inferior a 25 mm.

Analizando las precipitaciones del año 2011, Figura 43, la variabilidad patente del 2008, aún se acentúa más, ya que en 3 meses (marzo, mayo y noviembre) se registraron volúmenes de lluvias superiores a 100 mm. En otros meses como febrero, agosto, septiembre y diciembre, la precipitación acumulada fue prácticamente nula.

Por último, en el año 2010, se puede observar la marcada estacionalidad de las precipitaciones, una el primer semestre del año con un máximo relativo en el mes de mayo y un segundo máximo en la segunda mitad entre los meses de septiembre y octubre.

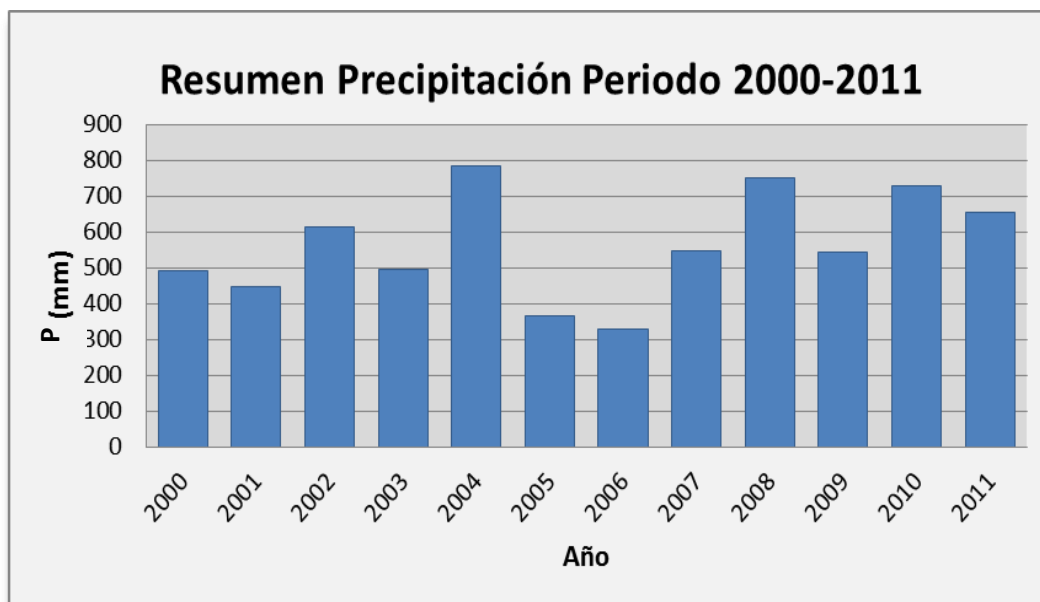


Figura 31: Resumen precipitación 2000-2011

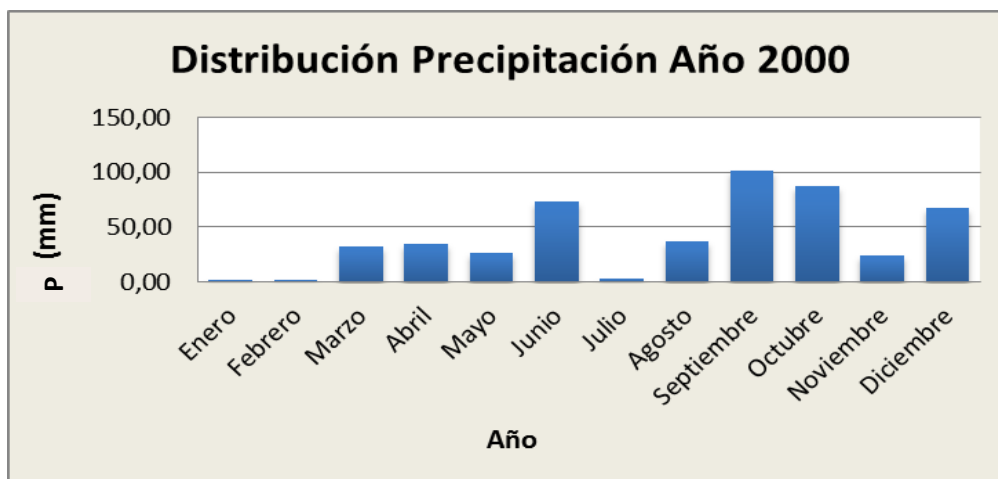


Figura 32: Precipitación anual año 2000

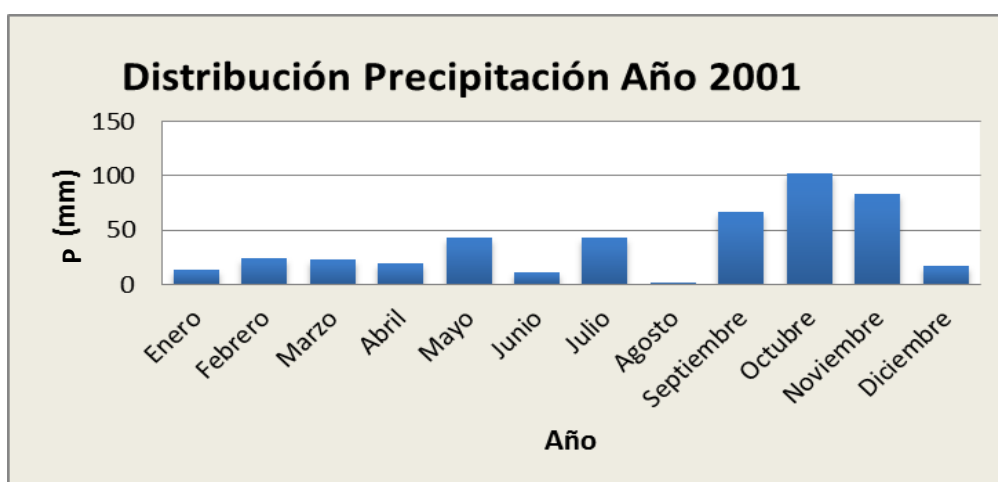


Figura 33: Precipitación anual año 2001

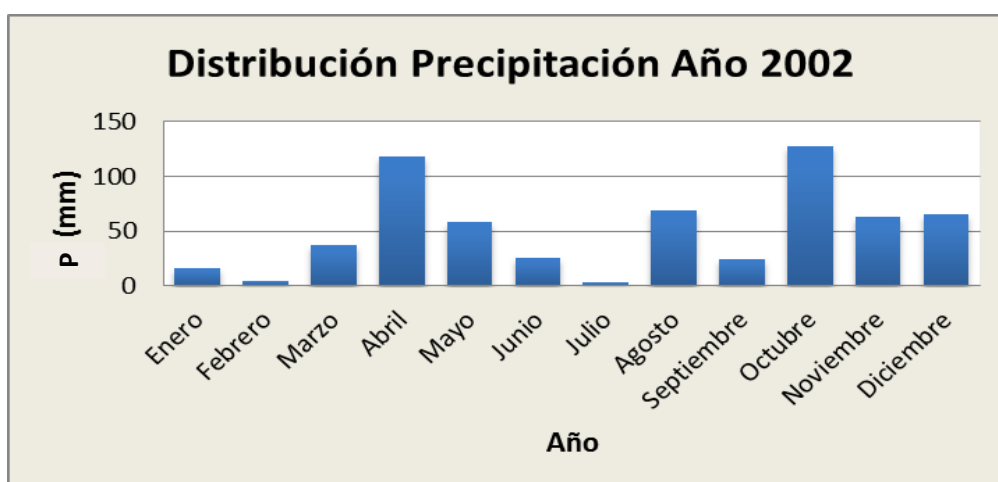


Figura 34: Precipitación anual año 2002

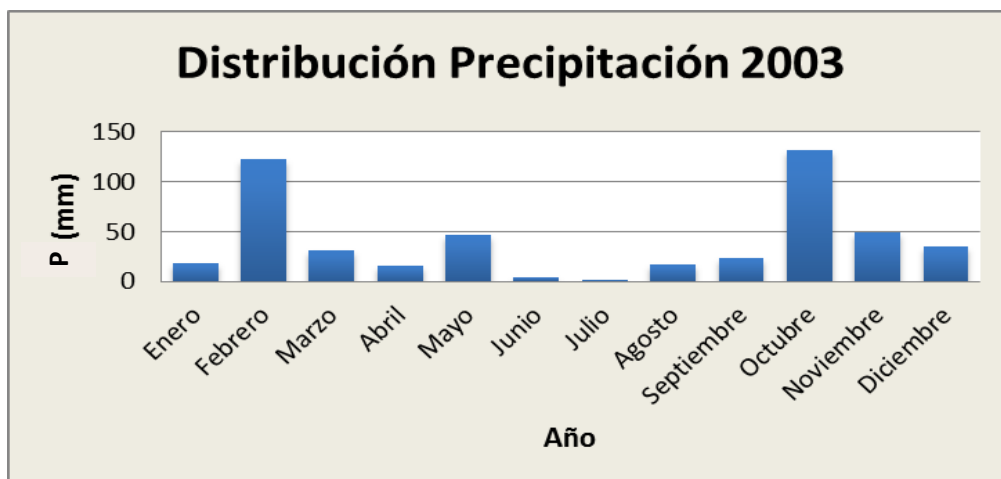


Figura 35: Precipitación anual año 2003

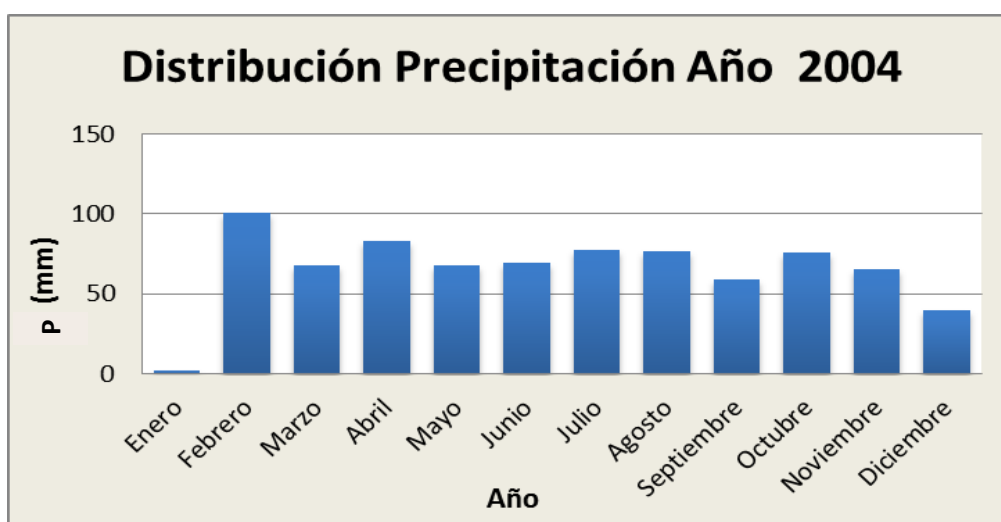


Figura 36: Precipitación anual año 2004

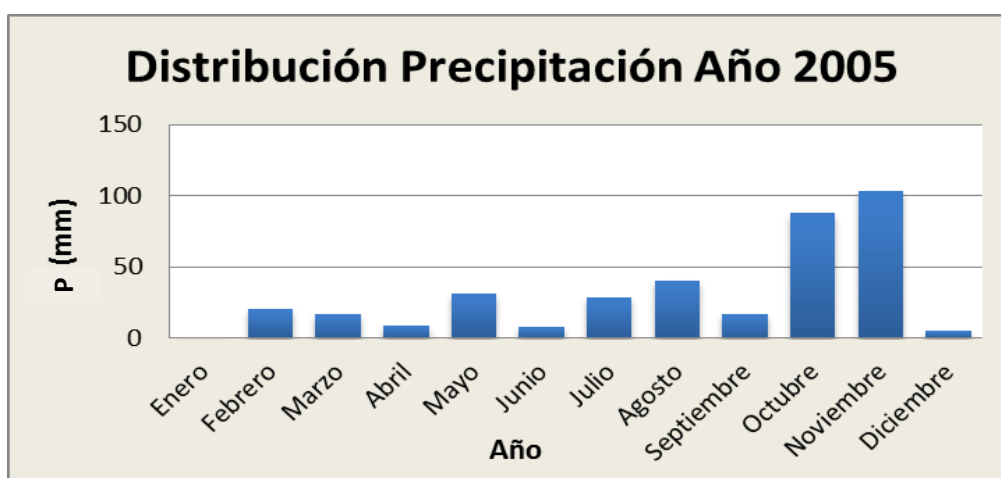


Figura 37: Precipitación anual año 2005

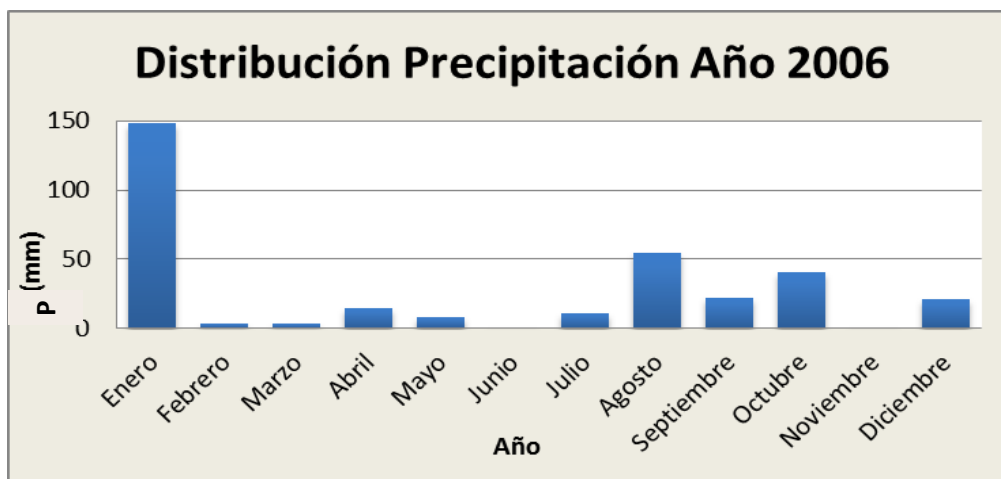


Figura 38: Precipitación anual año 2006

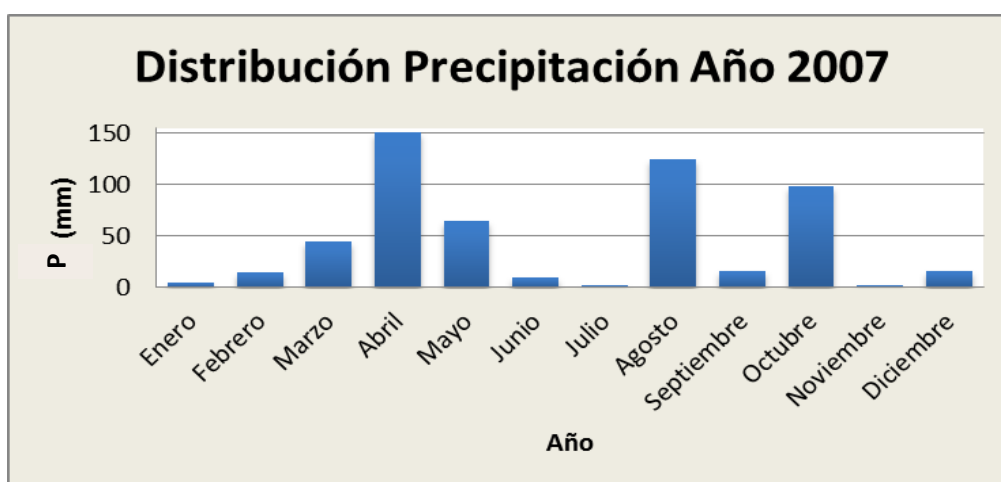


Figura 39: Precipitación anual año 2007

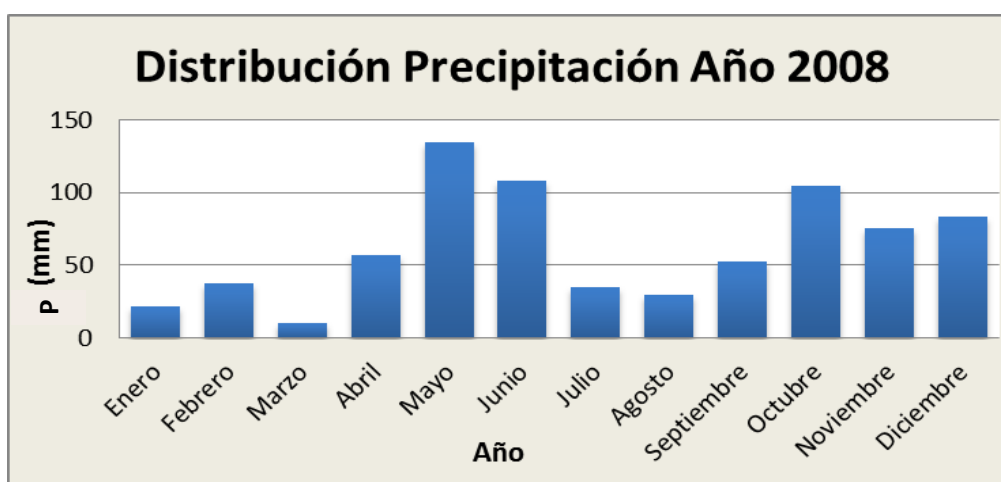


Figura 40: Precipitación anual año 2008

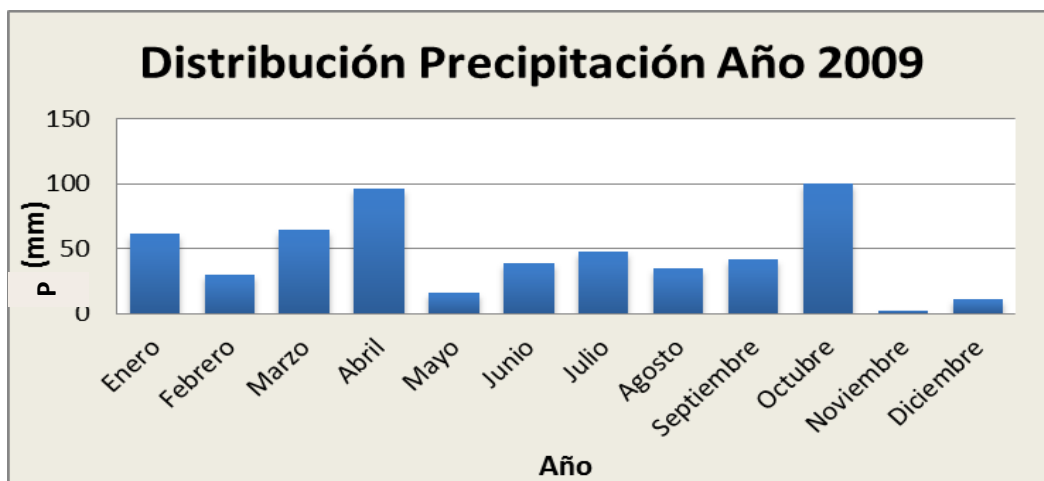


Figura 41: Precipitación anual año 2009

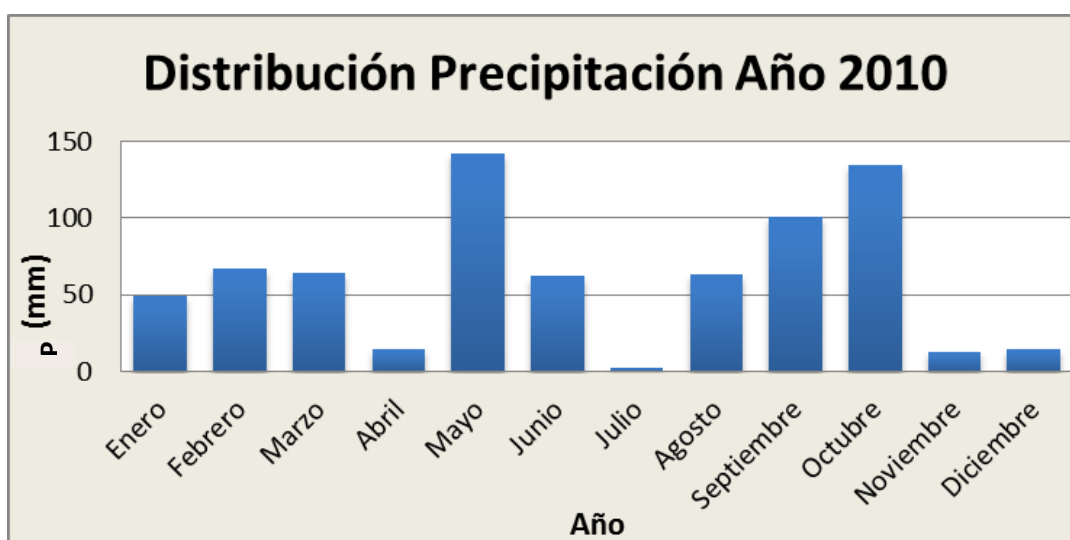


Figura 42: Precipitación anual año 2010

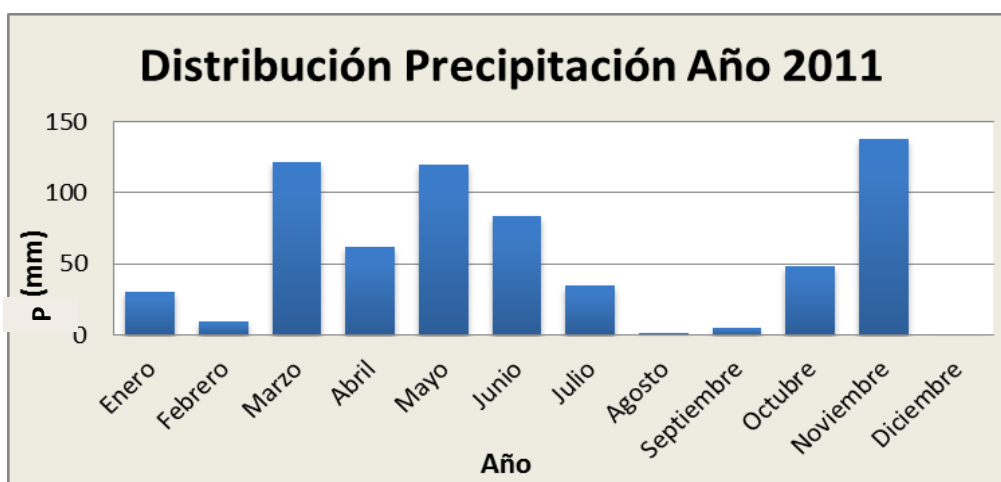


Figura 43: Precipitación anual año 2011

En la Tabla 9, se muestra el volumen de precipitación media en los meses del periodo de estudio, junto con su desviación estándar y el coeficiente de variación.

Tabla 9: Histórico de la precipitación media mensual período 2000-2011 (en mm)

	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
	30,62	36,32	43,12	66,91	63,31	41,22
<b>Desv.Estand.</b>	41,67	39,71	32,52	46,94	45,64	36,86
<b>CV</b>	1,36	1,09	0,75	0,83	0,72	0,89
	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
	24,33	45,58	44,24	94,97	51,53	31,34
<b>Desv. Estand.</b>	24,26	34,91	32,69	29,81	44,57	27,31
<b>CV</b>	1,00	0,77	0,74	0,31	0,87	0,87

Dentro de los principales períodos de lluvia en la zona de estudio: abril-mayo y septiembre-noviembre, también se observa variabilidad de unos años a otros durante el período de 2000-2011. En las Figuras 44 y 45 se muestra la precipitación de los meses de abril y mayo de todos los años del período analizado. En ambos meses la precipitación ha oscilando según el año entre 10 y 150 mm.

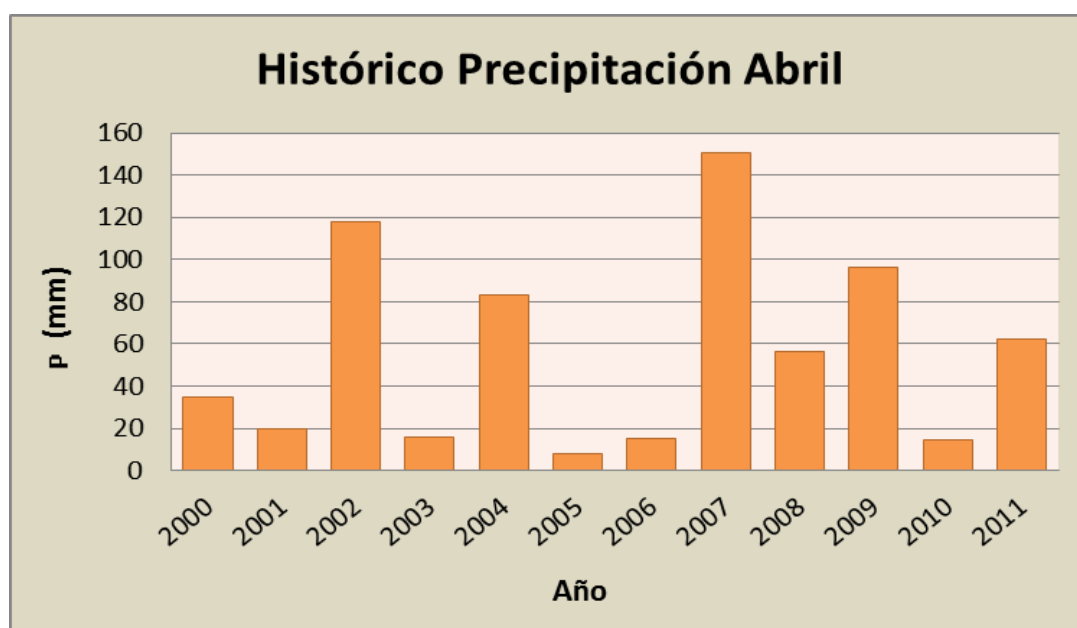


Figura 44: Histórico de la precipitación de los meses de abril

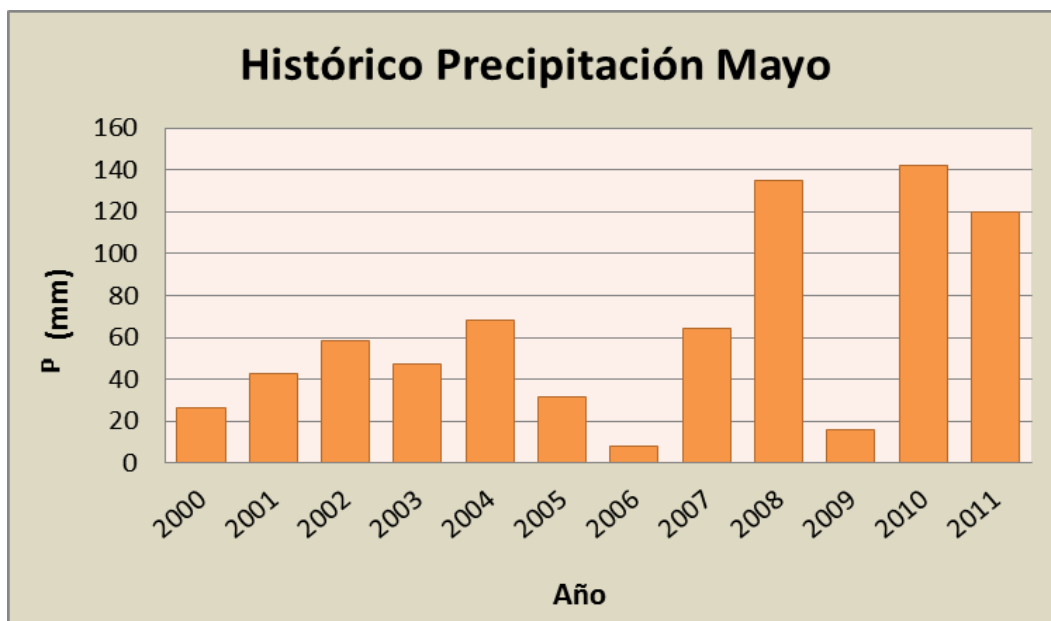


Figura 45: Histórico de la precipitación de los meses de mayo

Respecto al otro período de máximas lluvias, octubre acostumbra a ser el mes que registra mayor precipitación (véase Figura 46). La precipitación media es cercana a los 100 mm. Debido a las cantidades de lluvia y a las intensidades de las mismas, estas precipitaciones pueden ser las de mayor interés desde el punto de vista erosivo.

Si se observa el año 2010, se puede ver que, tanto el mes de mayo como el de octubre son los meses más lluviosos de la serie de años estudiados y si tal como se ha mencionado anteriormente el año 2010 es el tercer año con más volumen de precipitación registrado.

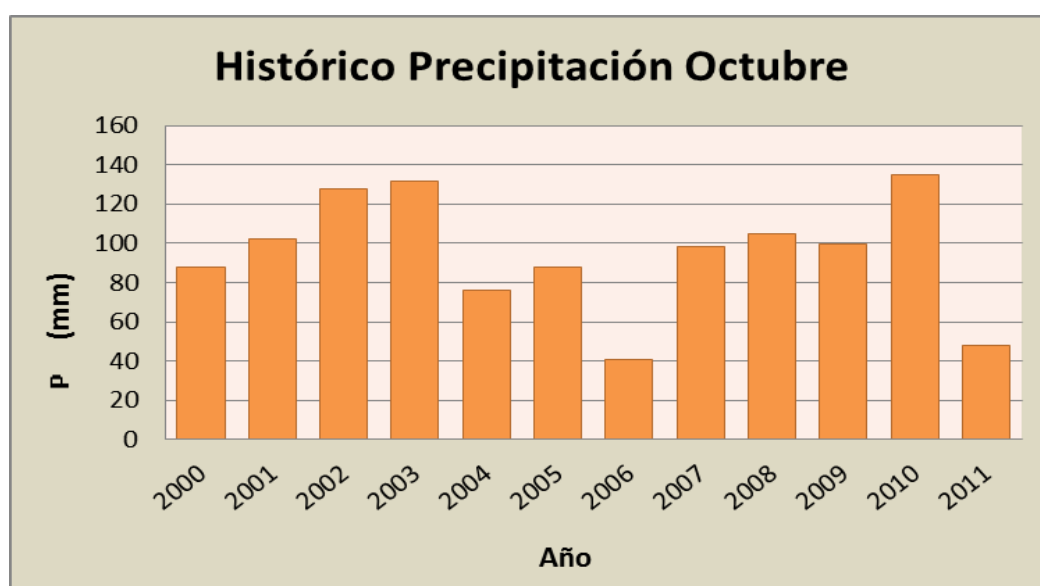


Figura 46: Histórico de la precipitación de los meses de octubre

## 7.2. PREDICCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE SUELO ACTUALES

Una vez que se caracteriza las lluvias que han tenido lugar en la cuenca de estudio durante los años 2000 hasta el 2011, se pasará a evaluar la producción de sedimentos o las pérdidas por erosión de la parcela, según los diferentes escenarios planteados y ejecutados mediante el programa SWAT.

En primer lugar, se presenta la predicción de la situación actual de la cuenca, sin ningún tipo de medida de conservación. Los resultados que se obtienen con el modelo sin aplicar ninguna medida de conservación, es decir en la situación actual. Los resultados de la simulación se muestran en la Figura 47, para todo el periodo analizado (2000 - 2011).

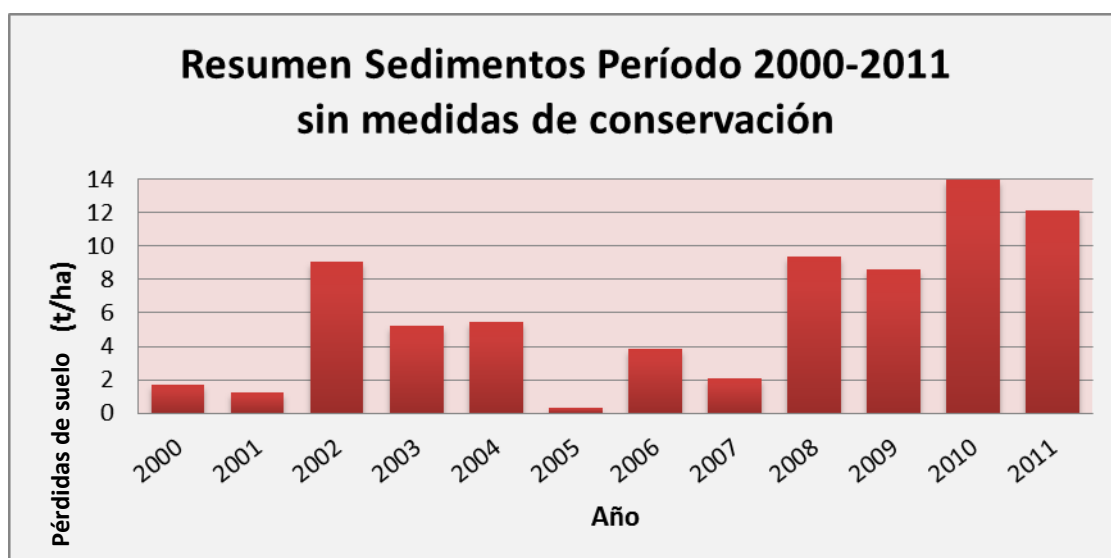


Figura 47: Sedimentos 2000-2011

Las pérdidas de suelo por erosión simuladas en la cuenca varían de unos años a otros del período analizado, entre valores próximos a 1 t/ha y valores de 14 t/ha. En la Figura 47, se puede observar que, según la simulación, los años con mayor producción de sedimentos corresponden a los años 2002, 2008, 2010 y 2011. El año en el que se produce mayor erosión es el 2010 seguido del 2011.

Los años con mayores pérdidas de suelo se corresponden con los años con mayor precipitación (ver Figura 31). Las mayores tasas de erosión se han predicho para los años 2002, 2008, 2010 y



2011, que son precisamente años con una mayor precipitación registrada. La excepción se ve marcada en el año 2004, donde hay un volumen de lluvias muy importante pero no existe una repercusión tan acusada en el volumen de sedimentos. Se ha de tener en cuenta que el año 2004 fue un período anormal, ya que fue muy lluvioso, pero con una distribución muy regular y por ello no se produjeron acumulaciones mensuales de más de 50 mm y las lluvias no arrastraron sedimentos.

Si se observa el resto de los años más lluviosos, sí que coincide con los de mayor producción de sedimentos, 2002 con 9,06 t/ha, 2008 con 9,36 t/ha, 2010 con 13,92 t/ha y 2011 con 12,09 t/ha. Si se entra en detalle en los años mencionados, las lluvias se comportaron según el patrón de estacionalidad anteriormente comentado. Fueron lluvias muy copiosas las precipitaciones de mayo de 2008, 2010 y 2011, abril de 2011 y octubre de 2002, 2008 y 2010.

En cambio, si se analizan los resultados de los años con menor precipitación, se observa que coincide con los de menor producción de sedimentos, sobretudo el 2005. El caso del año 2006, Figura 38, en que la precipitación fue muy baja, la erosión es diferente, es mayor, ya que hubo unos eventos de lluvia durante enero de 2006 que superaron los 140 mm, y estos provocaron la mayor parte de la erosión registrada en aquel año de 3,83 t/ha de sedimentos. De no ser por estas lluvias, las pérdidas por erosión tendrían unos niveles muy parecidos al año 2005 de 0,31 t/ha de sedimentos.

En la bibliografía se señalan algunos umbrales de tolerancia de pérdidas de suelos. Morgan, 1995, establece un valor de 1 t/ha. Sin embargo, para suelos agrícolas se consideran tasas mucho mayores que la ratio de recuperación del suelo por procesos naturales. (Pimentel y Skidmore, 1999) establecen para suelos agrícolas límites del orden de 11 t/ha y año y en aplicaciones de la RUSLE se establecen límites de tolerancia de pérdidas de suelo que oscilan entre 2,5 y 12 t/ha (IWR 2004). Se puede observar que la simulación de pérdidas por erosión conduce a valores que superan esta tasa, por lo que la sostenibilidad del sistema se puede ver afectada produciéndose un proceso de degradación progresivo, empobrecimiento del terreno y reducción de la producción agrícola comportando un incremento en los insumos para la producción y una consecuente disminución de los beneficios al haber una merma en el volumen de producción.

El análisis con el modelo ha permitido conocer además las zonas de la cuenca en las que la erosión es mayor. En la Figura 48, se muestra la distribución espacial de la erosión media en la

cuenca. Se puede observar que las mayores tasas de erosión se registran en las zonas más cercanas a la salida de la cuenca, donde el grado de la pendiente es mayor. Dicha zona es también la que ha experimentado mayores alteraciones antes de la plantación de la viña.

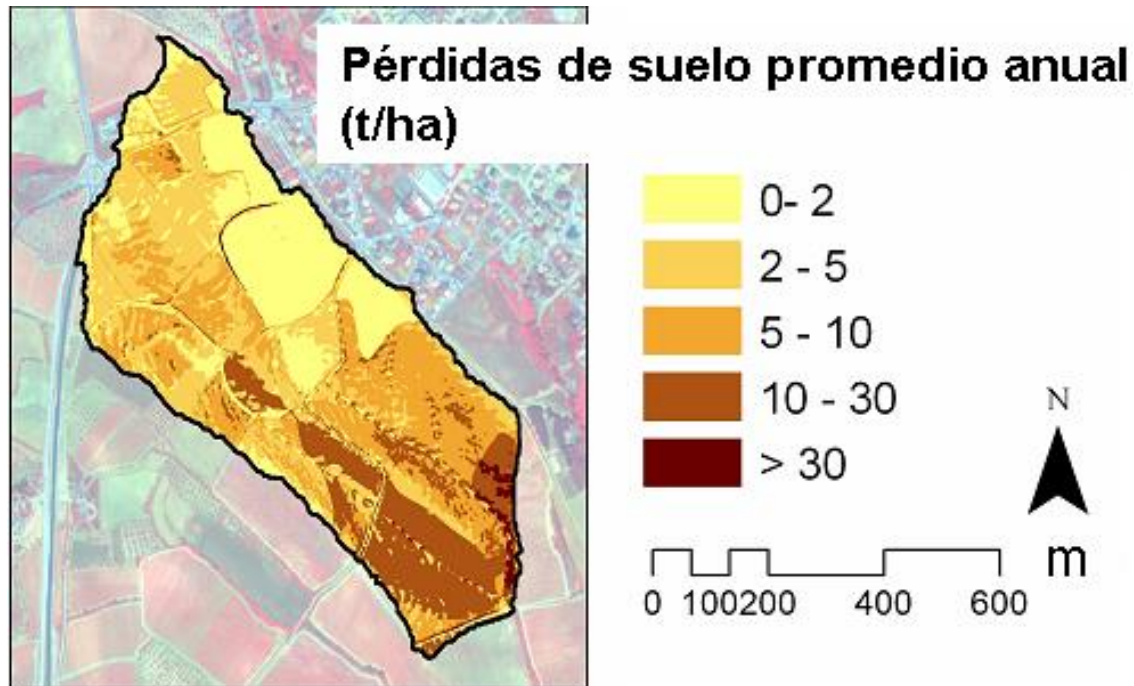


Figura 48: Variabilidad espacial de las pérdidas de suelo en la cuenca de estudio

### 7.3. PREDICCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE SUELO DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN

Después de haber presentado los resultados de las pérdidas de suelo simuladas sin ningún tipo de medida de conservación, se muestran los diferentes escenarios creados para ver los resultados que el programa SWAT muestra con varias opciones de medidas para prevenir y reducir la erosión.

En primer lugar, se presentará la simulación de una medida de conservación, Terrazas de desagüe junto con el canal principal con vegetación (Escenario A), después se mostrará los resultados cuando se aplica la medida de las franjas de vegetación (Escenario B) y por último,

se realizará el (escenario C) que será la combinación de las dos medidas anteriores “Terrazas de desagüe + Franjas de vegetación”.

- **ESCENARIO A: UNA MEDIDA DE CONSERVACIÓN, TERRAZAS DE DESAGÜE “BROAD TERRACES”**

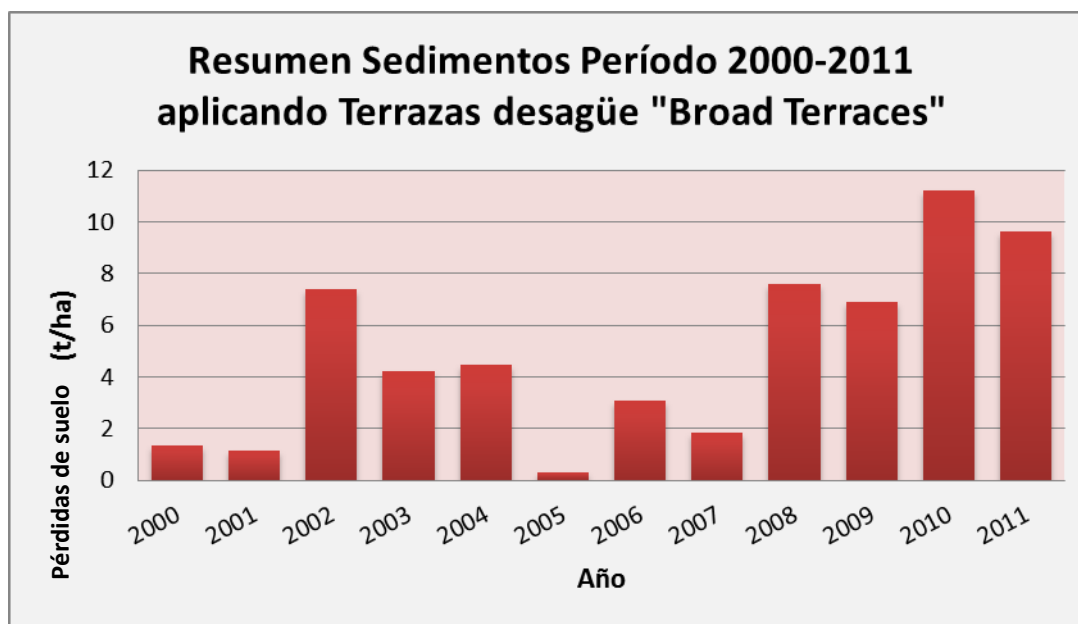


Figura 49: Sedimentos (t/ha) 2000-2011 con terrazas de desagüe

La aplicación de terrazas de desagüe y el canal principal con vegetación resulta efectiva en la disminución de pérdidas de suelo (Figura 49). De ahora en adelante, solamente nos referiremos a la medida de conservación de terrazas y canal principal revegetado como terrazas de desagüe. La reducción osciló entre un 3,2 y un 20,9 % (véase Tabla 10, donde se presenta el porcentaje de reducción de sedimentos una vez implementada la medida de conservación de terrazas de desagüe), registrándose dichas reducciones en todos los años, tanto secos como húmedos. Una particularidad es que los porcentajes de reducción de sedimentos aplicando la medida de control de erosión de terrazas de desagüe, concuerda parcialmente con los años más lluviosos o los que han acumulado un mayor volumen de precipitación. Las mayores reducciones en producción de sedimentos los encontramos en los años 2011, 2010 y 2003.

Tabla 10: Reducción de la generación de sedimentos con terrazas de desagüe

Año	Reducción de Sedimentos (%)
2000	20,93
2001	9,60
2002	18,21
2003	19,39
2004	18,25
2005	3,23
2006	19,06
2007	13,74
2008	19,02
2009	20,00
2010	19,25
2011	20,51
<b>Reducción Promedio (%)</b>	<b>16,77</b>

En promedio, el valor que representa en reducción de sedimentos al aplicar las terrazas de desagüe como medida de conservación, es del 16,77 %, frente al estado actual de la cuenca, sin ninguna medida de conservación.

Tal como se ha comentado las terrazas de desagüe eran una medida aplicada habitualmente por los viticultores en las antiguas plantaciones. Los resultados ponen de manifiesto su utilidad en la reducción de la erosión, por lo que sería necesario volver a implantarlas en las nuevas plantaciones. Teniendo en cuenta las dimensiones que se han calculado la planificación de una terraza cada cierto número de filas de viña no supondría una pérdida de superficie, ya que la anchura de la terraza coincide con la separación entre filas y sería de gran utilidad desde el punto de vista medioambiental, al evitar la pérdida del recurso suelo. Desde el punto de vista económico, las terrazas contribuirían a reducir el coste por pérdida de nutrientes.

- **ESCENARIO B: UNA MEDIDA DE CONSERVACIÓN, FRANJAS DE VEGETACIÓN “FILTER STRIP”**

En la Figura 50 se muestran los resultados de la simulación con la aplicación de franjas de vegetación. También se puede observar una reducción de la erosión respecto al escenario A. La disminución de la erosión es más notable que aplicando la medida del escenario anterior, terrazas. Con la capa herbada entre hileras, la reducción de los sedimentos es mucho mayor que aplicando terrazas de desagüe.

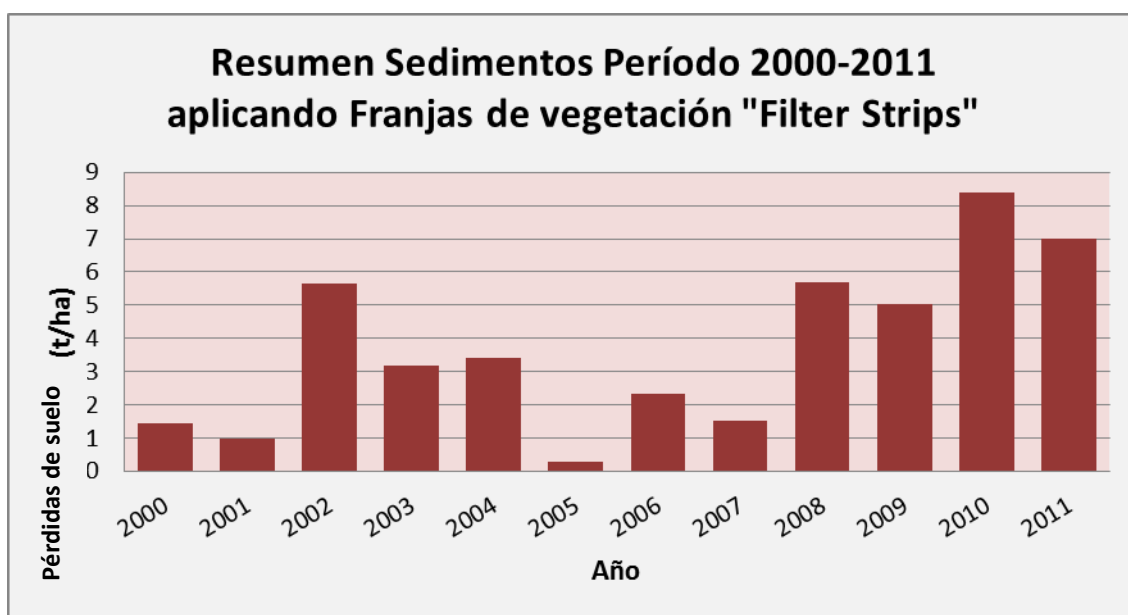


Figura 50: Sedimentación 2000-2011 aplicando franjas de vegetación

Para poder ver mejor los resultados obtenidos aplicando franjas de vegetación, se muestra la Tabla 11, con el porcentaje de reducción de sedimentos en comparación al estado actual de la cuenca. El promedio del porcentaje de reducción de sedimentos de aplicar esta medida de conservación es mayor que el de terrazas, aquí se obtiene un promedio de 32,69 %. En líneas generales podemos decir que, en el caso de la cuenca analizada, la aplicación de una capa de hierba entre las hileras de la plantación de vid sería una medida de conservación más eficaz que la aplicación de terrazas. Se puede observar que, en los años de mayor erosión, como 2002, 2008, 2009, 2010 y 2011, las reducciones se acercan al 40%. En la simulación no se puede modificar el tipo de cubierta a implantar, lo que sería un factor adicional a tener en cuenta.

Aunque esta medida no ha sido tradicionalmente aceptada por los viticultores ni aplicada en la zona por la escasez de agua, es una medida recomendada por el DARP (2010) en la guía de buenas prácticas agrícolas en viñedos en los últimos años comienza a haber cierta sensibilidad por su aplicación.

Tabla 11: Reducción de la generación de sedimentos con franjas de vegetación.

Año	Reducción de Sedimentos (%)
2000	16,86
2001	20,80
2002	37,53
2003	39,73
2004	37,77
2005	9,68
2006	39,43
2007	28,44
2008	39,10
2009	41,28
2010	39,58
2011	42,10
<b>Promedio Reducción (%)</b>	<b>32,69</b>

- **ESCENARIO C: COMBINACIÓN DE LAS DOS MEDIDAS DE CONSERVACIÓN, TERRAZAS DE DESAGÜE + FRANJAS DE VEGETACIÓN**

Por último, se procederá a analizar el último de los escenarios simulados con el programa SWAT. El escenario consiste en la combinación de las dos medidas anteriores de conservación, aplicadas a la vez: implementación de terrazas de desagüe y aplicación de una capa herbada entre las hileras del viñedo.

En la Figura 51, que representa la producción de sedimentos aplicando ambas medidas de conservación a la vez, se puede observar que la reducción es mucho más considerable que en cualquiera de las medidas aplicadas por separado. Las tasas de erosión en este caso oscilan entre  $< 1$  t/ha y alrededor de 8 t/ha.

En la Tabla 12, se muestran los porcentajes de reducción de la producción de sedimentos en comparación al estado actual de la finca de estudio.

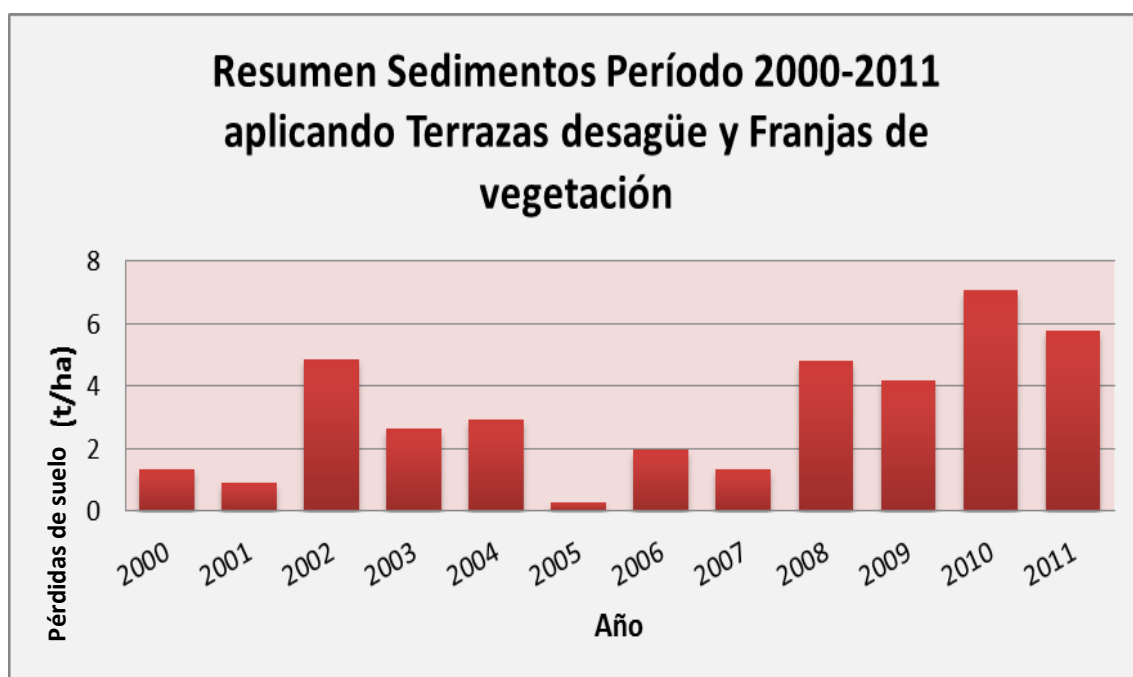


Figura 51: Sedimentación 2000-2011 aplicando terrazas + franjas de vegetación

Si el porcentaje promedio de reducción de erosión, con terrazas era del 16,77 %, con franjas de vegetación de 32,69 %, ahora combinando las dos medidas obtenemos un 40,31 %. En los años de más erosión como 2002, 2008, 2009, 2010 y 2011, las reducciones que se consiguen con las dos medidas es del 50 %. Los sedimentos se reducen a la mitad en éste escenario simulado.

Tabla 12: Reducción de la generación de sedimentos con terrazas desagüe + franjas de vegetación

Año	Reducción de Sedimentos (%)
2000	20,93
2001	25,60
2002	46,47
2003	49,24
2004	46,72
2005	9,68
2006	48,83
2007	35,55
2008	48,40
2009	51,16
2010	48,99
2011	52,11
<b>Promedio Reducción (%)</b>	<b>40,31</b>

Finalmente se muestran las Figuras 51 y 52 con las comparativas, año a año, de la producción de sedimentos aplicando los cuatro diferentes escenarios simulados (A, B, C) y el estado actual de la finca sin ninguna medida de conservación simulado en el programa SWAT y el porcentaje de reducción entre las tres opciones de medidas de conservación (Terrazas de desagüe (“Broad terraces”, franjas de vegetación (“Filter Strip”) y Terrazas desagüe (“Broad terraces”)+ franjas de vegetación (“Filter Strip”) y el estado actual.

La Figura 52 muestra como excepción el año 2005, la simulación del estado actual presenta los valores más elevados de erosión a diferencia de los escenarios A (Terrazas de desagüe), B (Franjas de vegetación) y C (Combinación de las dos medidas: Terrazas+ Franjas de vegetación). Es en el escenario C, dónde se obtienen los valores más reducidos de sedimentos.



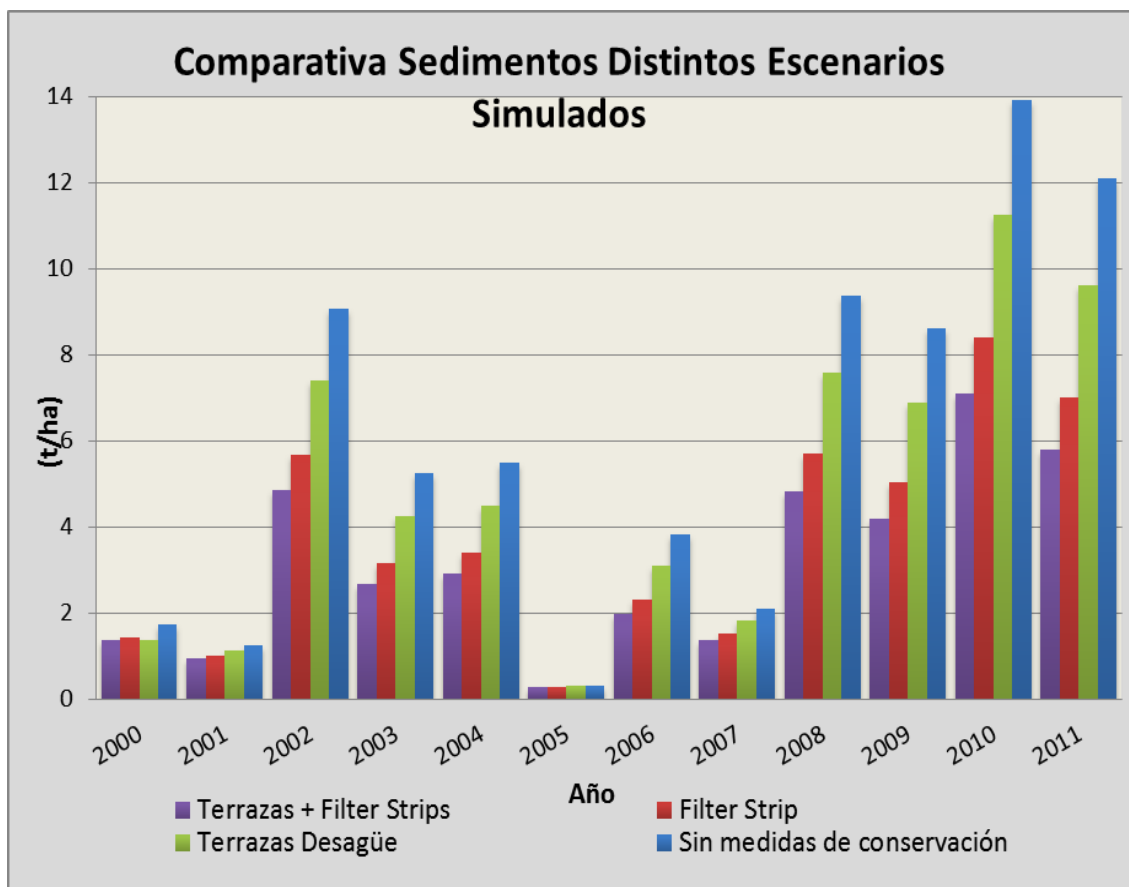


Figura 52: Comparativa erosión de los escenarios simulados

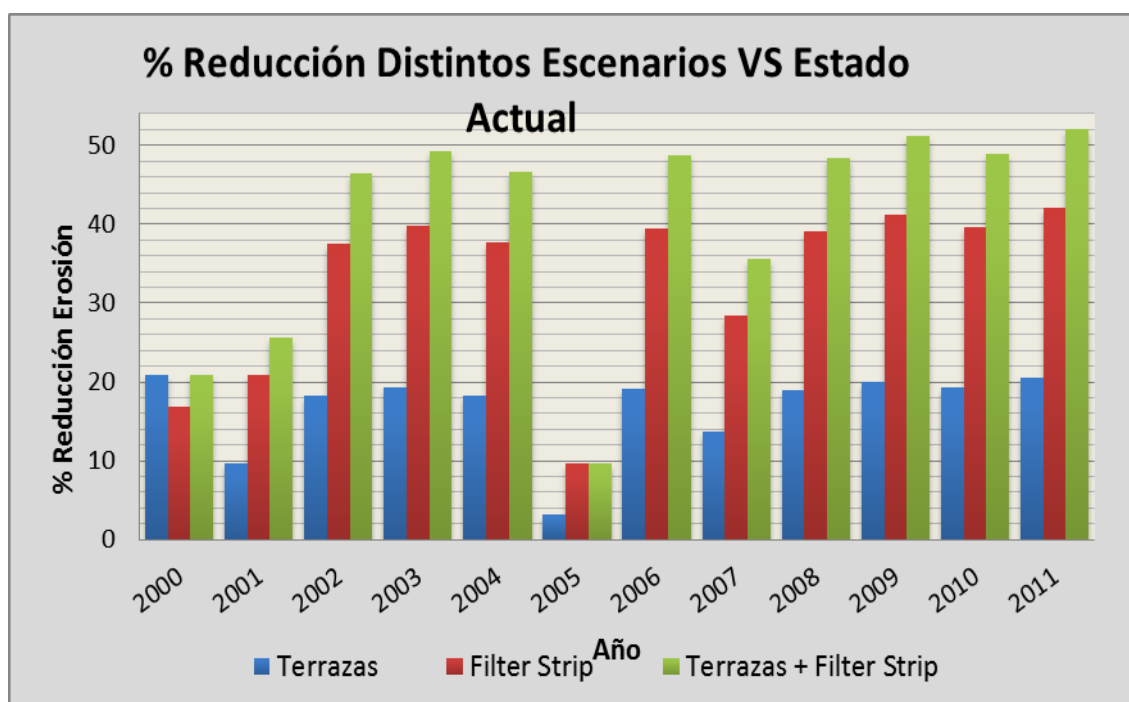


Figura 53: Porcentaje de reducción de la erosión de los diferentes escenarios frente al actual



Como observación final, si solamente se atiende a criterios de reducción de sedimentos, el escenario más favorable es el tercero, donde se combinan las dos medidas de conservación escogidas (Terrazas de desagüe + Franjas de vegetación), puesto que, se consiguen los mejores resultados frente a las pérdidas de suelo por erosión, causadas por los eventos de lluvia. Las reducciones son de casi el 50% en los años donde la erosión ha sido más acusada.

Si solamente se aplica una medida de conservación, se seleccionará aplicar una capa herbada en la finca entre las hileras, ya que los resultados por separado de las dos medidas presentadas, son mejores en el escenario de implantación de franjas de vegetación. Éstas, presentan reducciones en porcentaje de producción de sedimentos del 32,69%, frente a los porcentajes conseguidos mediante las terrazas de desagüe con solamente alcanzan el 16,77%.

A parte del criterio anteriormente citado, de la reducción de sedimentos, se tendría que mirar, el coste económico y protección del medio ambiente de las diferentes opciones y combinar ambos, a fin de encontrar la mejor solución, para la cuenca estudio y reducir la erosión que sufre, con el menor coste añadido.

#### **7.4 PREDICCIÓN DE LAS PÉRDIDAS DE NUTRIENTES ANTES Y DESPUÉS DE LA APLICACIÓN DE MEDIDAS DE CONSERVACIÓN**

A continuación, se presentan los resultados obtenidos después de la ejecución del programa SWAT, en los diferentes escenarios (según el tipo de medida de conservación implantada) de manera análoga como se hizo con la producción de sedimentos. Por tanto, existirá el escenario actual, dónde no se ha implementado ningún tipo de medida de conservación, el escenario con las terrazas aplicas, el escenario con las franjas de vegetación y por último el escenario que combina los dos tipos de medias anteriores (Terrazas + Franjas de vegetación).

Los elementos analizados son:

- $\text{NO}_3$  y Nitrógeno orgánico
- Fósforo soluble
- Fósforo orgánico

En la Figura 54, se representa la distribución de las pérdidas de nitrógeno  $\text{NO}_3$ , en la cuenca de estudio aplicando en el programa SWAT para cada uno de los escenarios simulados. Se observa claramente que cuando se trata de la simulación del estado actual de la cuenca, sin ningún tipo de medida de conservación aplicada, los kg de  $\text{NO}_3$  que se pierden por hectárea superan con creces los otros escenarios con algún tipo de medida de conservación.

Por otro lado, cuando se realiza la ejecución del programa con las medidas de conservación de Franjas de vegetación y Terrazas + Franjas de vegetación, no existe prácticamente diferencia entre ambos casos, pero sí que su aplicación reduce pérdida de  $\text{NO}_3$  respecto al estado actual. En cambio, donde se encuentra la mayor reducción de pérdida de kg/ha de  $\text{NO}_3$  es en la ejecución de Terrazas. Por tanto, queda patente que aplicando cualquier medida de conservación se consigue una disminución en la pérdida de  $\text{NO}_3$ .

Analizando los datos, coincide que los años de mayores precipitaciones, como el 2004 y el 2008, han sido los años en los cuales se ha registrado una mayor cantidad de  $\text{NO}_3$  perdido (kg nutrientes/ha), por el efecto de lavado o arrastrado de las precipitaciones abundantes sobre el terreno de la cuenca de estudio.

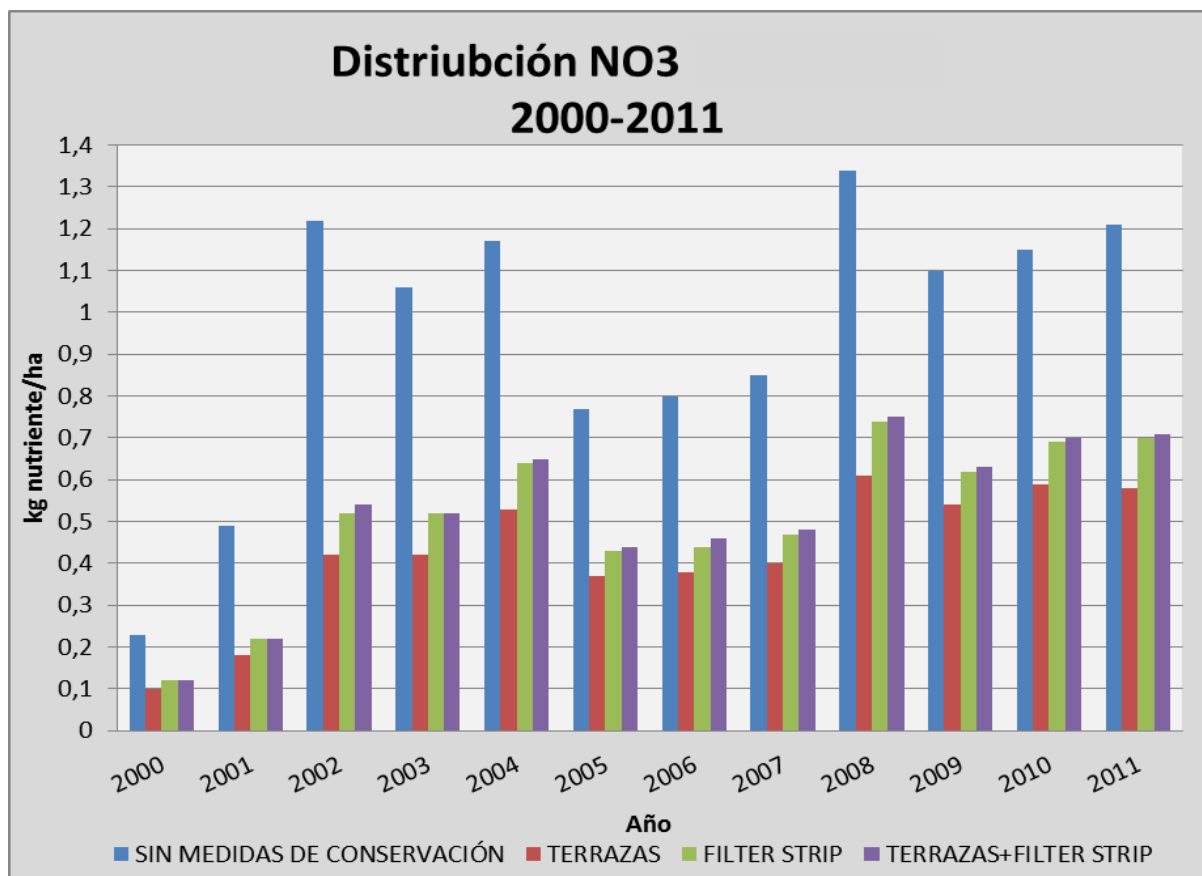


Figura 54: Pérdidas de N- NO<sub>3</sub> en el período 2000-2011

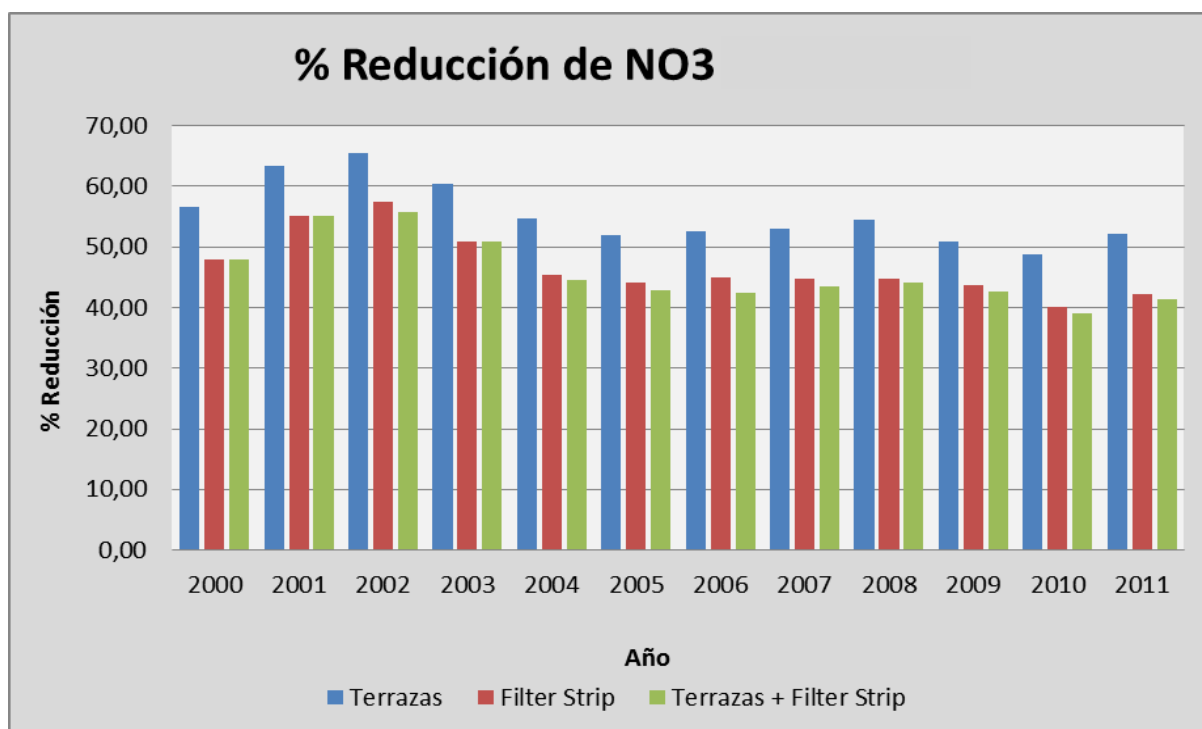


Figura 55: Porcentaje de reducción de las pérdidas de N-NO<sub>3</sub> en el período 2000-2011 bajo diferentes escenarios

En la Tabla 13, se observan los valores de reducción de pérdidas de kg de NO<sub>3</sub>/ha expresados en %, y efectivamente, tal y como indicaba la Figura 54 y 55, la medida de conservación que consigue un mayor porcentaje de reducción en la pérdida de éste nutriente son las terrazas de desagüe con un 55,33%, respecto a las pérdidas del estado actual de la cuenca. En cambio, los escenarios de franjas de vegetación y Terrazas de desagüe + Franjas de vegetación no presentan demasiadas diferencias entre las dos medidas, ambos escenarios consiguen unas reducciones cercanas al 46% en pérdidas de nitratos

Tabla 13: Reducción de las pérdidas de N-NO<sub>3</sub> con diferentes medidas de conservación

AÑO	Reducción NO <sub>3</sub> (%)		
	Terrazas	"Filter Strip"	Terrazas + "Filter Strip"
2000	56,52	47,83	47,83
2001	63,27	55,10	55,10
2002	65,57	57,38	55,74
2003	60,38	50,94	50,94
2004	54,70	45,30	44,44
2005	51,95	44,16	42,86
2006	52,50	45,00	42,50
2007	52,94	44,71	43,53
2008	54,48	44,78	44,03
2009	50,91	43,64	42,73
2010	48,70	40,00	39,13
2011	52,07	42,15	41,32
<b>Promedio Reducción (%)</b>	<b>55,33</b>	<b>46,75</b>	<b>45,85</b>

El siguiente elemento analizado por las Figuras 56 y 57 y la Tabla 14, corresponde al nitrógeno orgánico. Con éste elemento, al igual que ocurría con el fósforo orgánico, el valor de mayor

porcentaje de reducción en la pérdida de N orgánico se consigue con la implantación de Terrazas de desagüe + Franjas de vegetación.

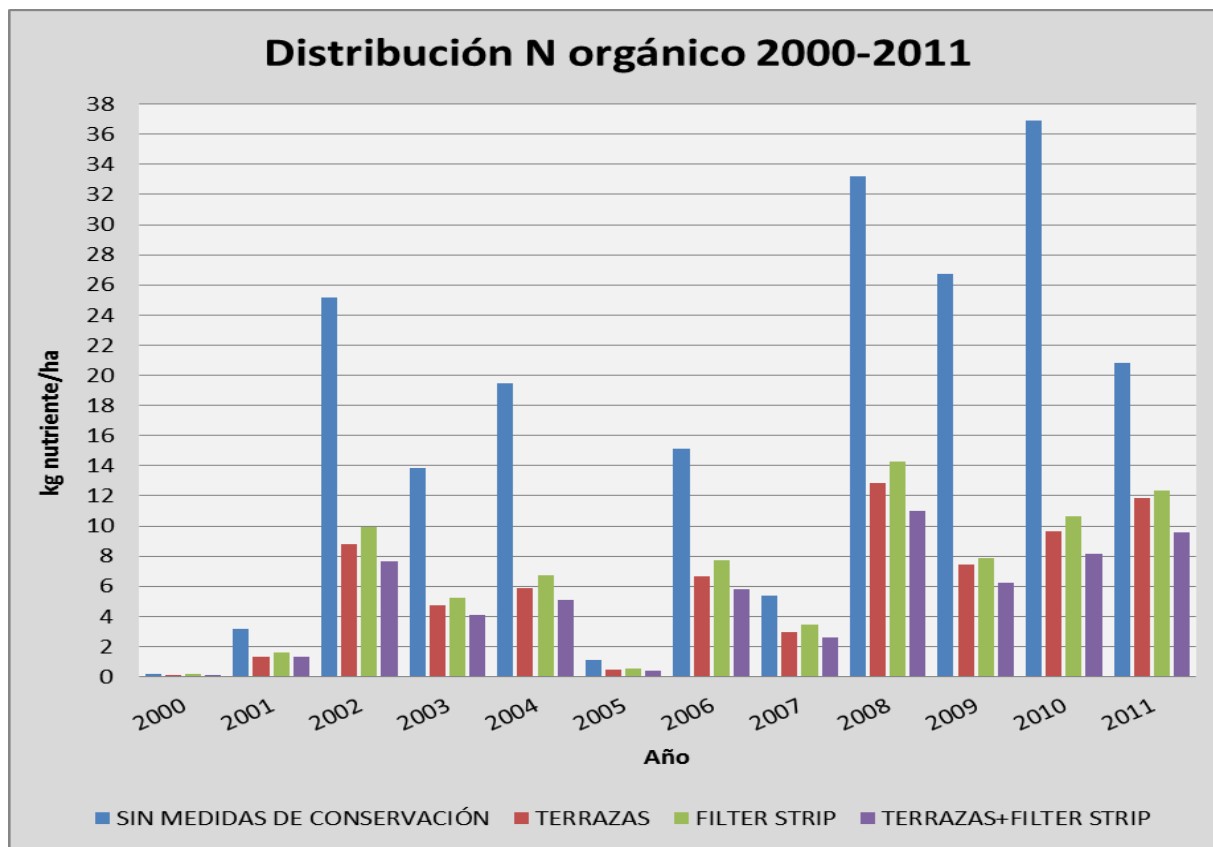


Figura 56: Pérdidas de nitrógeno orgánico en el período 2000-2011 en diferentes escenarios

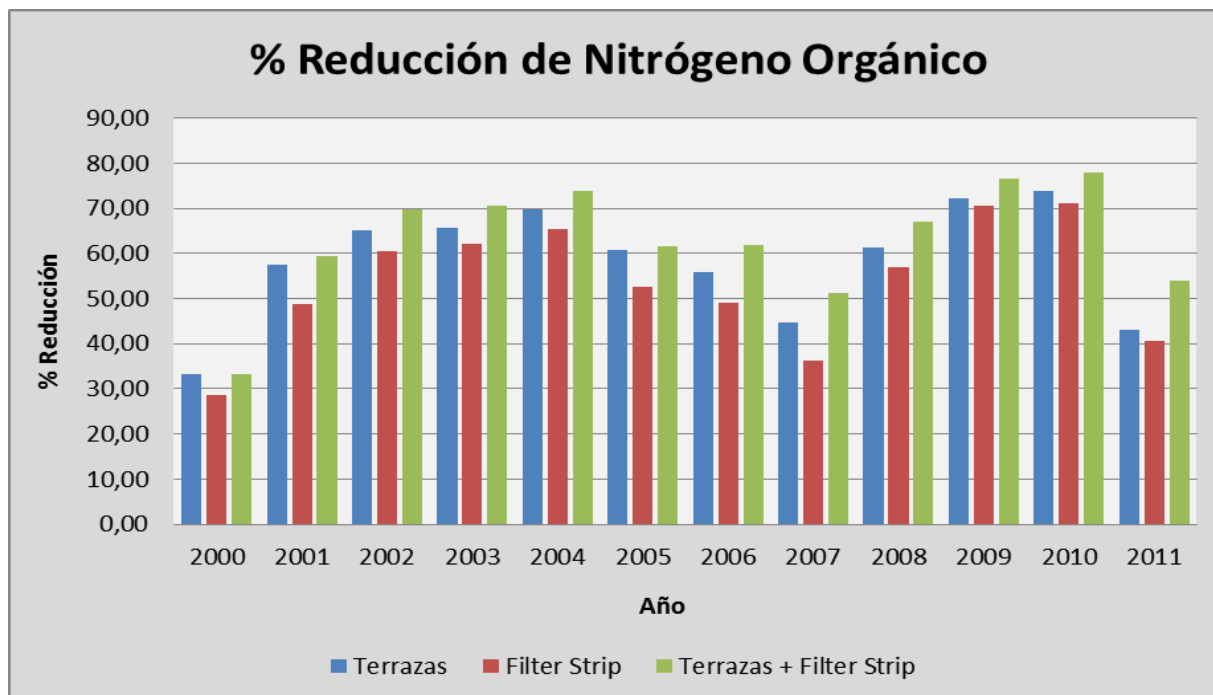


Figura 57: Porcentaje reducción de las pérdidas de N orgánico en el período 2000-2011 bajo diferentes escenarios

El porcentaje de reducción con la aplicación de Terrazas de desagüe + “Filter Strip” es del 63 %, en cambio, con la aplicación de Terrazas y de franjas de vegetación, los valores que se obtienen son 59 % y 53 %, respectivamente.

Tabla 14: Reducción de las pérdidas de N Orgánico con diferentes medidas de conservación

AÑO	Reducción N Orgánico (%)		
	Terrazas	“Filter Strip”	Terrzas + “Filter Strip”
2000	33,33	28,57	33,33
2001	57,41	48,90	59,31
2002	65,09	60,44	69,70
2003	65,80	62,26	70,57
2004	69,85	65,49	73,85
2005	60,71	52,68	61,61
2006	55,89	48,94	61,77
2007	44,61	36,25	51,30
2008	61,25	56,91	66,94
2009	72,21	70,64	76,63
2010	73,84	71,24	77,82
2011	43,06	40,51	53,92
<b>Promedio Reducción (%)</b>	<b>58,59</b>	<b>53,57</b>	<b>63,06</b>

Seguidamente, se presentan las Figuras 58 y 59 mostrando los resultados correspondientes a los datos analizados para el elemento fósforo orgánico. Tanto como las pérdidas de dicho nutriente en los diferentes escenarios (actual y con las distintas medidas de conservación de suelos aplicadas). Se puede apreciar que, en toda la serie de los años de estudio, el escenario actual es donde se produce más pérdidas de fósforo, asociado a la producción de sedimentos y otros factores.

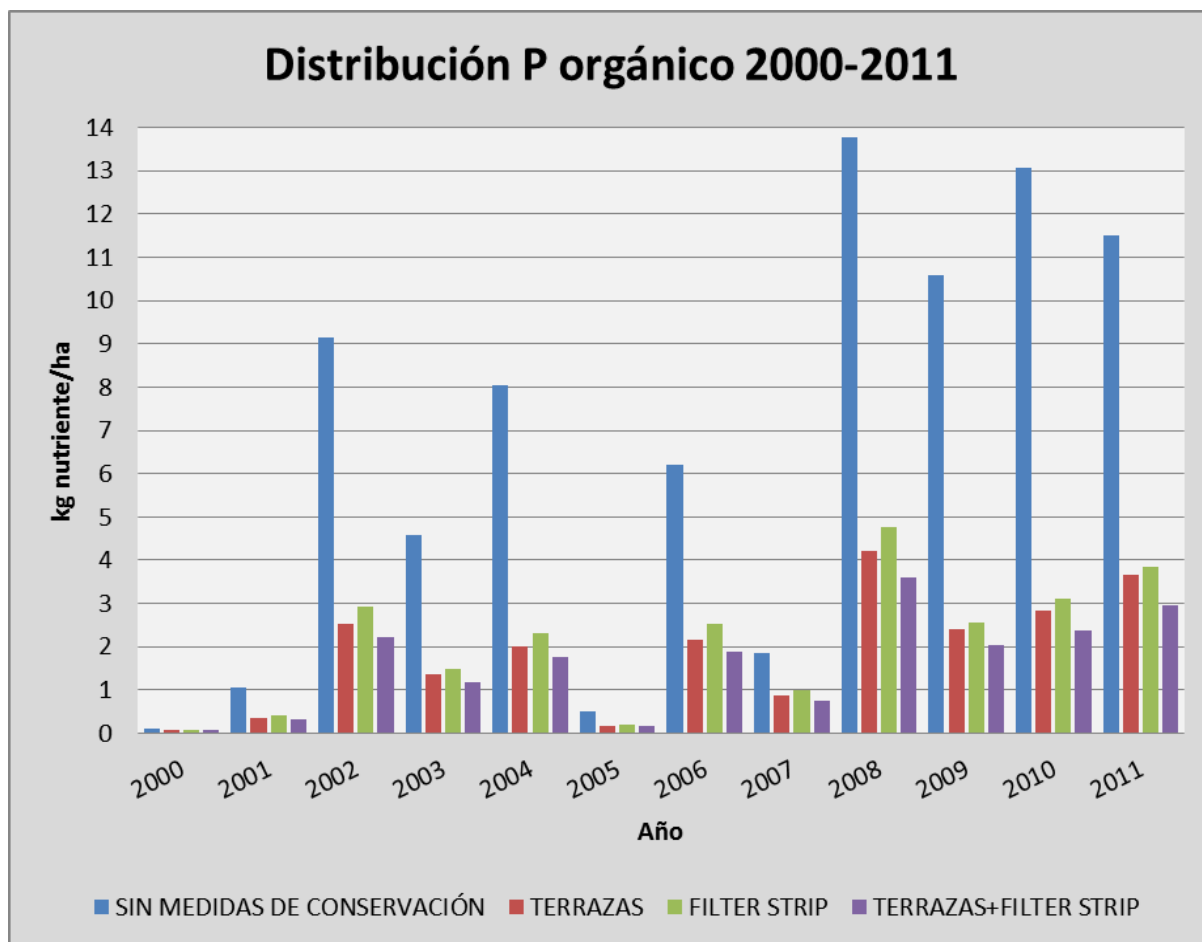


Figura 58: Pérdidas de fósforo orgánico en el período 2000-2011 bajo los diferentes escenarios

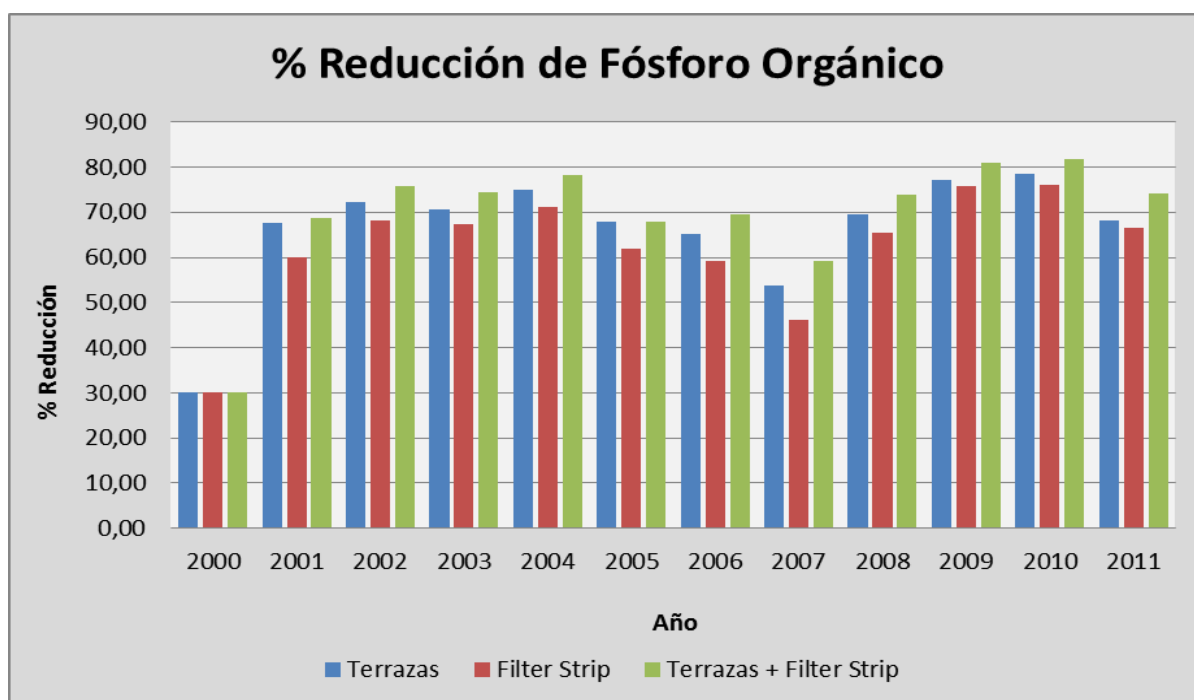


Figura 59: Porcentaje de reducción del fósforo orgánico en el período 2000-2011 bajo diferentes escenarios



En el caso del fósforo, el escenario más favorable y donde se muestra una reducción más importante en la pérdida de dicho nutriente es en Terrazas + franjas de vegetación (“Filter Strip”) con un valor promedio de reducción de casi el 70% (véase Tabla 15) respecto a los valores registrados del estado actual de la cuenca. Con la implantación de Terrazas y Franjas de vegetación se consiguen unas reducciones del orden del 66 % y 62%, respectivamente.

Tabla 15: Reducción de las pérdidas de P Orgánico con diferentes medidas de conservación

AÑO	Reducción P Orgánico (%)		
	Terrazas	“Filter Strip”	Terrazas + “Filter Strip”
2000	30,00	30,00	30,00
2001	67,62	60,00	68,57
2002	72,21	68,05	75,82
2003	70,59	67,32	74,51
2004	75,00	71,27	78,11
2005	68,00	62,00	68,00
2006	65,22	59,10	69,57
2007	53,76	46,24	59,14
2008	69,40	65,48	73,84
2009	77,26	75,85	80,85
2010	78,41	76,11	81,70
2011	68,29	66,46	74,20
<b>Promedio Reducción (%)</b>	<b>66,31</b>	<b>62,32</b>	<b>69,52</b>

El último nutriente analizado en las diferentes simulaciones es el fósforo soluble. Semejante a los dos casos anteriores (fósforo orgánico y nitrógeno orgánico) el escenario con una reducción más importante en la pérdida de fósforo soluble es el de Terrazas de desagüe + Franjas de vegetación, véase Figuras 60 y 61 y Tabla 16.

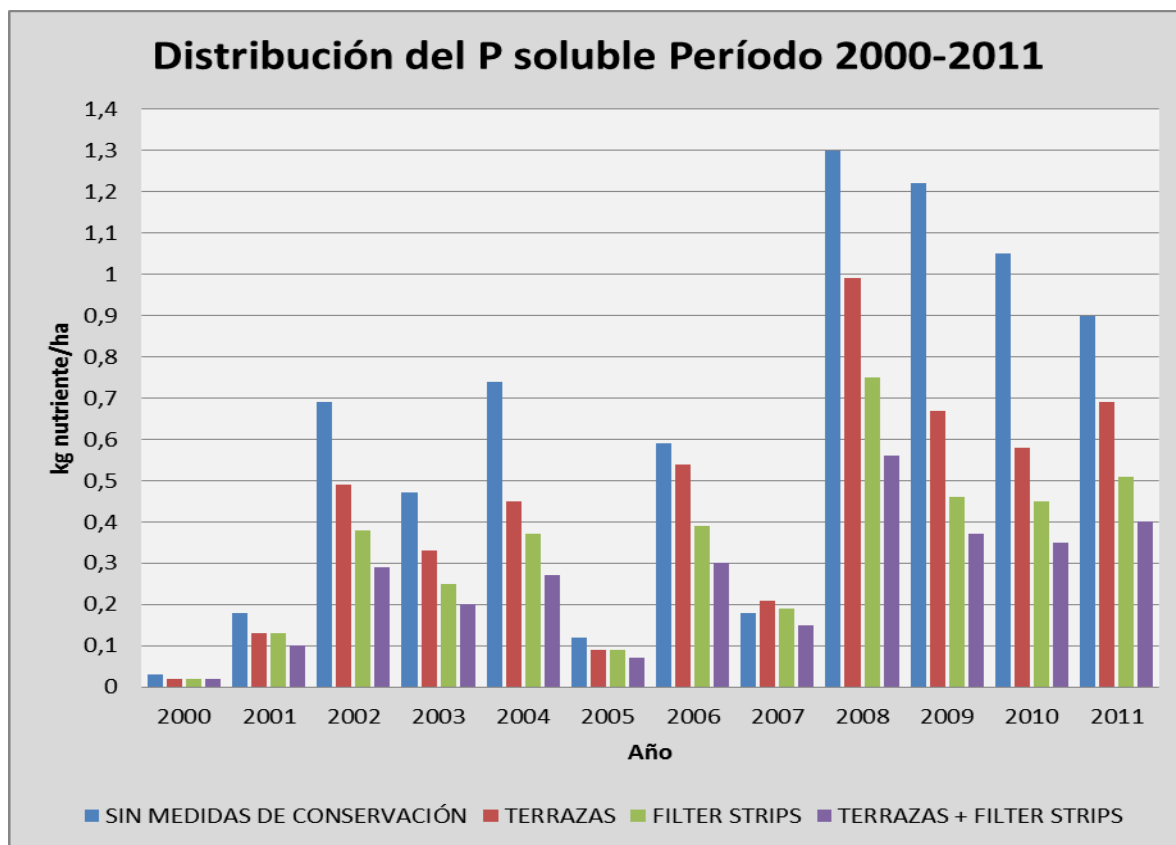


Figura 60: Pérdidas de fósforo soluble en el período 2000-2011 bajo diferentes escenarios

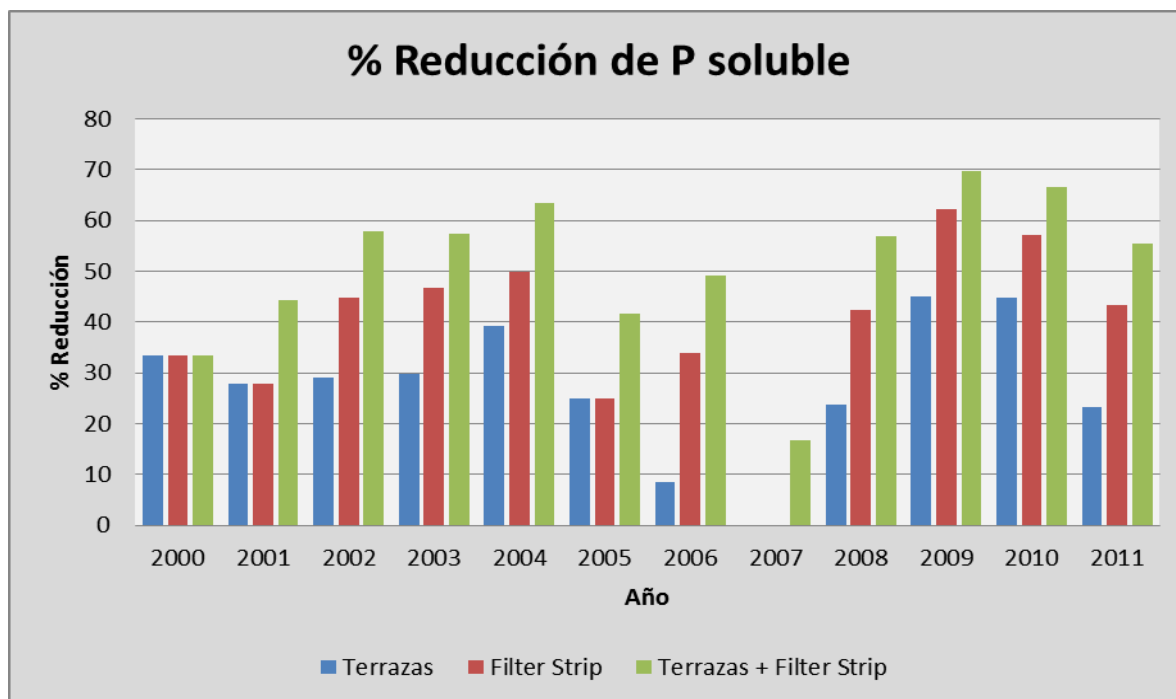


Figura 61: Porcentaje de reducción del P soluble en el período 2000-2011 bajo diferentes escenarios

La reducción promedio del escenario de Terrazas + “Filter Strip” es del 50 % en la pérdida de fósforo soluble. En cambio, las reducciones en los escenarios de Terrazas y de Franjas de vegetación son muy inferiores con valores promedio de 26 % y 38 % respectivamente. Cabe destacar, en el año 2007, los datos que se obtienen en las simulaciones de Terrazas y “Filter Strip” son anómalos, expresando porcentajes negativos de reducción.

Tabla16: Reducción de (P Soluble) con diferentes medidas de conservación

AÑO	Reducción P Soluble (%)		
	Terrazas	“Filter Strip”	Terrazas + “Filter Strip”
2000	33,33	33,33	33,33
2001	27,78	27,78	44,44
2002	28,99	44,93	57,97
2003	29,79	46,81	57,45
2004	39,19	50,00	63,51
2005	25,00	25,00	41,67
2006	8,47	33,90	49,15
2007	-16,67	-5,56	16,67
2008	23,85	42,31	56,92
2009	45,08	62,30	69,67
2010	44,76	57,14	66,67
2011	23,33	43,33	55,56
<b>Promedio % Reducción</b>	<b>26,08</b>	<b>38,44</b>	<b>51,08</b>

Respecto a la pérdida de nutrientes, tanto en el fósforo y nitrógeno orgánico como en el fósforo soluble, los porcentajes mayores de reducción se consiguen con la simulación de Terrazas + “Filter Strip”, a excepción del NO<sub>3</sub> percolado que la tasa de mayor reducción se obtiene con la aplicación de las Terrazas de desagüe.

En referencia al estado actual de la cuenca de estudio, sea cual sea la o las medidas de conservación que se apliquen, siempre se obtienen reducciones en la pérdida de nutrientes.



## 8. VALORACIÓN ECONÓMICA DE LA IMPLANTACIÓN DE LAS MEDIDAS DE CONSERVACIÓN

### • CÁLCULO DE LA INVERSIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS TERRAZAS DE DESAGÜE

En primer lugar, se presenta la maquinaria elegida para realizar la excavación de las terrazas y del canal principal. Se escoge una máquina retroexcavadora-cargadora modelo CAT 420E + tractor con remolque.

El ciclo de carga ideal de dicha máquina es el siguiente, teniendo en cuenta que una hora son 50 minutos:

Ciclo de carga: hincar la pala, cargar la pala, maniobra, descarga y regreso al punto de carga.

Ciclo de carga ideal es de 20 segundos en 50 minutos = 150 ciclos/hora por un rendimiento ideal del 100% son 150 m<sup>3</sup>/h.

Ahora bien, en las condiciones normales de trabajo los rendimientos oscilan sobre un 60 %, así que obtenemos 90 m<sup>3</sup>/h de movimiento de tierras.

Para calcular el volumen de tierra a mover para realizar las terrazas, solamente aplicaremos en la cuenca derecha ya que es donde el viñedo está plantado siguiendo las curvas de nivel. Este tramo es de 725 metros de largo.

725 metros /24 metros de separación entre terrazas = 31 terrazas.

El volumen para extraer de tierra en una terraza es de 87,5 m<sup>3</sup> (ver Tabla 17):

Tabla 17: Cálculo volumen de tierra de una terraza

Sección	0,350 metros	
triangular		87,5 m <sup>3</sup> por terraza
Longitud	250 metros	

Entonces, como para realizar una terraza la máquina necesita mover 87,51 m<sup>3</sup> de tierra por terraza, el volumen total de movimiento de tierras para poder realizar el total de las 31 terrazas calculadas es de **2712,5 m<sup>3</sup>**.

$$87,5 \text{ m}^3 \times 31 \text{ terrazas} = 2712,5 \text{ m}^3$$

Los precios de hora de trabajo para el modelo de máquina son de 62,5 €/hora.

Para saber el total del coste de realizar las 31 terrazas de desagüe será el siguiente:

$$\frac{2712,5 \text{ m}^3}{90 \text{ m}^3/h} = 30,14 \text{ h} \qquad 30,14 \text{ h} \times 62,5 \text{ €/h} = 1883,75 \text{ €}$$

- **CÁLCULO DE LA INVERSIÓN DE IMPLEMENTACIÓN DEL CANAL DE DESAGÜE PRINCIPAL**

- **TRAMO 1: INICIAL**

El cálculo del tramo superior en el cual se dividió la cuenca de estudio (véase Figura 13), se realiza de la misma manera que se ha hecho para las terrazas, pero teniendo en cuenta las dimensiones calculadas en el apartado 5.3 del presente proyecto. Pero como se ha indicado, las terrazas no se aplicarán en la totalidad de las parcelas de viñedo de la cuenca. Solamente se actuará en aquellas que la plantación es perpendicular a la dirección de la pendiente, y las parcelas que cumplen mencionado requisito se encuentran en el tramo 2 y tramo 3 de la cuenca.

Por esta razón, no se computarán los costes de realización del canal principal del tramo 1, ya que no habrá terrazas de desagüe que desemboquen en él.

- **TRAMO 2: INTERMEDIO**

En el tramo 2, se procederá a calcular el volumen total de tierras a mover, según las dimensiones de canal calculadas en el apartado 5.3.

En la Tabla 18, se muestra en resumen de las mimas y el volumen total de 1380,10 m<sup>3</sup> de tierra en el tramo 2.

Tabla 18: Cálculo volumen de tierra Tramo 2

<b>Sección canal</b>	3,594 metros	<b>1380,10 m<sup>3</sup> tramo 2</b>
<b>Longitud</b>	384 metros	



Para mover el volumen total de tierra del tramo de canal intermedio, el coste es de **958,4 €**.

$$1380,10 \frac{m^3}{90 \frac{m^3}{h}} = 15,33 h \quad 15,33 h \times 62,5 \frac{€}{h} = 958,4 €$$

#### ○ TRAMO 3: FINAL

En el tramo 3, se calculará el volumen total de tierras a mover, según las dimensiones de canal calculadas en el apartado 5.3.

En la Tabla 19, se muestra en resumen de las mimas y el volumen total de 1826,25 m<sup>3</sup> de tierra en el tramo final.

Tabla 19: Cálculo volumen de tierra Tramo 3

Sección	4,87 metros	1826,25 m <sup>3</sup> tramo 3
Longitud	375 metros	

Para mover el volumen total de tierra del tramo de canal intermedio, el coste es de **1268,22 €**.

$$1826,25 \frac{m^3}{90 \frac{m^3}{h}} = 20,29 h \quad 20,29 h \times 62,5 \frac{€}{h} = 1268,22 €$$

#### • INVERSIÓN TOTAL DE IMPLEMENTACION DE LAS TERRAZAS DESAGÜE Y EL CANAL PRINCIPAL

Para saber el total del coste de la actuación de implementar las terrazas de desagüe y de los tramos de canal principal véase Tabla 20.

Tabla 20: Coste total implantación Terrazas + Canal principal

ACTUACIÓN	PRECIO ACTUACIÓN	TOTAL
31 Terrazas desagüe	1883,75€	4110,37 €
Canal Tramo 2	958,4 €	
Canal Tramo 3	1268,22 €	

- CÁLCULO DEL COSTE DE IMPLEMENTACIÓN DE LAS FRANJAS DE VEGETACIÓN**

Para poder implementar las medidas de franjas de vegetación se ha escogido la especie *Lolium perenne* (Figura 62) y la *Festuca arundinacea* (Figura 63).



Figura 62: Imagen de *Lolium perenne*





Figura 63: Imagen de *Festuca arundinacea*

El objetivo de realizar la franja de vegetación es que está se componga de un 90% de *Festuca arundinacea* o de *Lolium perenne* ya que son perennes con una buena cobertura y el 10% restante de *Trifolium subterraneum* (véase Figura 64) ya que es una leguminosa anual y ayudaría a fijar el nitrógeno en el suelo.



Figura 64: Imagen de *Trifolium subterraneum*



En la Tabla 21 se presentan las diferentes dosis de siembra de las variedades seleccionadas para realizar las franjas de vegetación:

Tabla 21: Dosis de siembra de la cobertura de las franjas de vegetación

Especie	Dosis de siembra
<i>Lolium perenne</i>	33,36 kg/ha
<i>Festuca arundinacea</i>	27,80 kg/ha
<i>Trifolium subterraneum</i>	30 kg/ha

La superficie de la zona donde se implantarán las franjas de vegetación es de 10 ha a razón de un ancho de 3 metros de ancho de cada franja se obtiene 33333,33 m para plantar la cobertura (3,33 ha). El precio de cada especie se muestra en la Tabla 22.

Tabla 22: Coste de las diferentes especies de franjas de vegetación

Especie	Dosis de siembra	Superficie siembra	Coste kg semilla	Coste total
<i>Lolium perenne</i>	33,36 kg/ha	2,97 ha	3,15 €	312,10 €
<i>Festuca arundinacea</i>	27,80 kg/ha	2,97 ha	3,45 €	284,85 €
<i>Trifolium subterraneum</i>	30 kg/ha	0,333 ha	7,65€	76,4235 €

El coste total de las franjas de vegetación será el reflejado en la Tabla 23, según la combinación de especies que se seleccione:

Tabla 23: Coste total plantación franjas de vegetación

Especie	Coste total
<i>Lolium perenne</i> + <i>Trifolium subterraneum</i>	312,10 €
<i>Festuca arundinacea</i> + <i>Trifolium subterraneum</i>	284,85 €

## • CÁLCULO DEL COSTE DE FERTILIZACIÓN N Y P

Teniendo en cuenta que según la bibliografía las recomendaciones de necesidades de fertilización para el cultivo de la vid (cultivo mayoritario en la cuenca de estudio), en referencia a los macronutrientes N y P son de 40UF/ha (unidades fertilizantes) y 25 UF/ha respectivamente. Se procede a elegir un fertilizante específico para cada nutriente, es decir, se empleará un fertilizante simple, con el fin de ajustar al máximo la dosis de fertilización y evitar fertilizaciones en exceso para alguno de los elementos.

La fertilización se ha calculado en el escenario actual, según las necesidades del cultivo y sin ningún tipo de medida de conservación de suelos. A parte, con el escenario actual, se debe tener en cuenta el volumen de suelo de sedimentos que se pierde, que corresponde a 6,085t/ha y los nutrientes en N y P que se marchan con dicha erosión.

### ○ Cálculo nitrógeno necesidades de cultivo

En el caso del nitrógeno, se elige la formulación simple de nitrato amónico al 34,5% de la casa comercial YARA.

Tabla 24: Datos fertilización nitrógeno

Producto comercial	Nitrato amónico – $\text{NO}_3\text{NH}_4$
Formulación N-P-K	0-34,5-0 (34,5%)
Presentación	Sacos de 25Kg
Necesidades UF cultivo	40 UF/ha

Sabiendo que las necesidades de la viña por hectárea para el nitrógeno son de 40 UF, obtenemos:

$$\text{Fertilizante N (Kg)} = 1 \text{ ha} \cdot \frac{40 \text{ UF N}}{\text{ha}} \cdot \frac{100 \text{ kg}}{34,5 \text{ UF N}} = 115,94 \text{ kg}$$

Con el cálculo anterior, podemos saber la cantidad de fertilizante de nitrógeno amoniacal sólido al 34,5%, que sería de 116 kg/ha.

El precio del fertilizante nitrato amónico 34.5% de la casa comercial YARA con presentación de sacos de 25kg, es de 0.518€/Kg.

$$\text{Coste total fertilización N} = (0,518 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} \bullet 3381,4 \text{ kg}) = 1751,56 \text{ €}$$

○ **Cálculo Fósforo necesidades de cultivo**

Análogamente, se procede a realizar los cálculos del coste de las necesidades de fertilización para el fósforo. Los datos a contemplar son los siguientes, representados en la tabla 25:

Tabla 25: Datos fertilización fósforo

Producto comercial	Superfosfato triple – Na <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>
Formulación N-P-K	0-46-0 (46%)
Presentación	Sacos de 50Kg
Necesidades UF cultivo	25 UF/ha

Se empleará el producto Superfosfato triple al 46% y teniendo en consideración que las recomendaciones de fertilización de dicho nutriente son de 25UF/ha.

Se gastarán 54,34 kg/ha de superfosfato triple 46% para cubrir las necesidades de una hectárea de cultivo. Si lo trasladamos al global de la cuenca de estudio con sus 29,15ha, sería de 2521,37 kg de Superfosfato triple.

Actualmente el coste del producto en presentación de sacos de 50kg, es de 21,5€.

Por tanto, los costes de fertilización de las necesidades de fósforo de la plantación de viñedo de 29,15 son de **1080,31€**.

$$\text{Coste total fertilización P} = (0,43 \frac{\text{€}}{\text{Kg}} \bullet 2521,37 \text{ kg}) = 1084,20 \text{ €}$$

A parte, en la tabla 26, se detalla las pérdidas de kg/ha de nutriente según el escenario actual y con las simulaciones de las diferentes medidas de conservación aplicadas.

Tabla 26: Pérdidas promedio (kg/ha) de cada nutriente según escenario

Escenario	NO <sub>3</sub>	N orgánico	P soluble	P orgánico
Actual sin medidas	0,949	16,767	0,623	6,702
Terrazas de desagüe	0,427	6,066	0,433	1,882
Filter Strips	0,509	6,710	0,333	2,103
Terrazas+ Filter Strips	0,518	5,173	0,257	1,612



- **COSTE DE MANTENIMIENTO EN LA SITUACIÓN ACTUAL**

- **Suelo:**

Mediante el modelo SWAT, a través de su simulación, se estimó que las pérdidas promedio de suelo actuales son de 5,65t/ha (Figura 47: Sedimentos 2000-2011). Teniendo en cuenta que nuestra finca de estudio ocupa una superficie de 29,15ha, el total estimado de pérdidas de suelo será de 164,70t de sedimentos anuales.

Según la base de datos del ITEC (Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya), el precio para el m<sup>3</sup> de terraplén de suelo seleccionado, transportado a destino y depositado es de 4,57 €/m<sup>3</sup> y que la densidad aparente del suelo agrícola de la zona de estudio es de 1,6 g/cm<sup>3</sup> obtenemos un valor de **470,42 €** anuales en reposición de suelo agrícola.

- **Fertilización:**

Necesidades del cultivo

El coste de fertilización anual de los nutrientes N y P en la situación actual solamente para cubrir las necesidades de cultivo, sin ninguna medida de conservación, asciende a **2831,87€**.

A parte, en la situación actual, el balance de pérdidas de kg/ha de los nutrientes N y P son los expresados en la tabla 26, obtenemos.

Pérdidas de nutrientes por erosión

Las pérdidas de nitrógeno promedio por erosión son de 17,71 de kg N/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del N es de 0,518€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 9,18€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **267,30€** anuales.

Las pérdidas de fósforo promedio por erosión al año son de 7,32kg/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del P es de 0,43€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 3,14€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **91,75€** anuales.

El total de la pérdida promedio de los fertilizantes N y P debido a la erosión anual es de **359,05€**, que representan un 12,7% de los costes anuales de fertilización del cultivo.

## Resumen

Los costes anuales de reposición de tierras y fertilización ascienden a **3302,29 €** tal y como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27: Resumen Costes situación actual

CONCEPTO	PRECIO
Suelo	470,42€
Fertilización	2892,53 €
TOTAL	3302,29 €

- **COSTE DE MANTENIMIENTO ESCENARIO DE TERRAZAS DE DESAGÜE**

- **Suelo:**

Para su cálculo se contempla que, a lo largo del período de estudio, el porcentaje de reducción promedio de la generación de sedimentos según indica la Tabla 10 es de 16,77%. Entonces la cantidad promedio de tierra de cultivo que es arrastrada en forma de sedimentos es de 4,70 t/ha. En la finca dentro de la cuenca de estudio del presente proyecto es de 29,15 ha supone un total de 137,05 t /año.

Teniendo en cuenta que el m<sup>3</sup> de terraplén de suelo seleccionado transportado a destino y depositado es de 4,57 €/m<sup>3</sup> y que la densidad real del suelo agrícola es de 1,6 g/cm<sup>3</sup> obtenemos un valor de **391,32 €** anuales en reposición de suelo agrícola.

- **Fertilización:**

Pérdidas de nutrientes por erosión

Las pérdidas de nitrógeno promedio por erosión son de 6,493 kg N/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del N es de 0,518€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 3,36€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **98,04€** anuales.

Las pérdidas de fósforo promedio por erosión al año son de 2,315kg/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del P es de 0,43€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 0,99€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **29,01€** anuales.

El total de la pérdida promedio de los fertilizantes N y P debido a la erosión anual es de **127,05€**, que representan un 4,4% de los costes anuales de fertilización del cultivo

- **Repara de terrazas de desagüe y canal:**

Al aplicar las terrazas de desagüe con su canal existirá un coste adicional anual de reparación de las mismas después de los eventos de lluvia que las alteren. Por ello se ha contemplado unas 8 hora de reparación a 62,5 €/hora asciende un total de **500€** anuales.

**Resumen:**

Los pagos anuales de reposición de tierras, fertilización (N y P) y repara de medidas de conservación ascienden a **876,08 €** tal y como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27: Resumen costes escenario terrazas de desagüe

CONCEPTO	PRECIO
Suelo	376,08 €
Repara de terrazas de desagüe	500 €
<b>TOTAL</b>	<b>876,08 €</b>

• **COSTE DE MANTENIMIENTO ESCENARIO DE FRANJAS DE VEGETACIÓN**

- **Suelo:**

Para su cálculo se considera que, a lo largo del período de estudio, el porcentaje de reducción promedio de la generación de sedimentos según indica la Tabla 11 es de 32,69%. Entonces la

cantidad promedio de tierra de cultivo que es arrastrada en forma de sedimentos es de 3,80 t/ha. En la cuenca estudio del presente proyecto es de 46,40 ha supone un total de 110,77 t/año. Se obtiene un valor de **316,39 €** anuales en reposición de suelo agrícola.

- **Fertilización:**

Mediante la aplicación de franjas de vegetación, se reduce el volumen de sedimentos generados en comparativa a la situación actual y se calcula reducción promedio de la pérdida de nutrientes, con ésta medida de conservación.

Pérdidas de nutrientes por erosión

Las pérdidas de nitrógeno promedio por erosión son de 7,22 kg N/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del N es de 0,518€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 3,74€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **109,02€** anuales.

Las pérdidas de fósforo promedio por erosión al año son de 2,436kg/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del P es de 0,43€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 1,05€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **30,53€** anuales.

El total de la pérdida promedio de los fertilizantes N y P debido a la erosión anual es de **139,55€**, que representan un 4,9% de los costes anuales de fertilización del cultivo.

- **Siembra cobertura vegetal:**

Se calcula el coste de siembra de la cobertura vegetal de las franjas de vegetación que asciende a **284,85 €** *Festuca arundinacea + Trifolium subterraneum*

**Resumen:**

Los costes anuales de reposición de tierras, fertilización y repara de medidas de conservación ascienden a **589,16 €** tal y como se muestra en la Tabla 28.

Tabla 28: Resumen costes escenario franjas de vegetación

CONCEPTO	PRECIO
Suelo	304,31 €
Siembra cobertura vegetal	284,85 €
<b>TOTAL</b>	<b>589,16 €</b>

- **COSTE DE MANTENIMIENTO ESCENARIO DE TERRAZAS + FRANJAS DE VEGETACIÓN**

- **Suelo:**

Para su cálculo se tiene en cuenta que, a lo largo del período de estudio, el porcentaje de reducción promedio de la generación de sedimentos según indica la Tabla 12 es de 40,31%. Entonces la cantidad promedio de tierra de cultivo que es arrastrada en forma de sedimentos es de 3,21 t/ha. En la cuenca estudio del presente proyecto es de 29,15 ha supone un total de 97,57 t /año. Obteniendo un valor de **267,26 €** anuales en reposición de suelo agrícola.

- **Fertilización:**

Pérdidas de nutrientes por erosión

Las pérdidas de nitrógeno promedio por erosión son de 5,691 kg N/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del N es de 0,518€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 2,95€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **85,93€** anuales.

Las pérdidas de fósforo promedio por erosión al año son de 1,87kg/ha. Sabiendo que, el precio de la fertilización del P es de 0,43€/kg, el coste de las pérdidas promedio anuales por erosión de dicho nutriente ascienden a 0,840€/ha y para los viñedos de la cuenca sería de **23,44€** anuales.

El total de la pérdida promedio de los fertilizantes N y P debido a la erosión anual es de **109,37€**, que representan un 3,8% de los costes anuales de fertilización del cultivo.



Debida a la reducción de sedimentos que se obtiene al aplicar de manera conjunta las dos medidas de conservación de Terrazas de desagüe + Franjas de vegetación, se calcula las necesidades de N y P, para dicho escenario.

El coste total de la fertilización anual de los elementos (N y P) con la aplicación de las dos medidas de conservación combinadas asciende a **1360,31 €**.

- **Reparación de terrazas de desagüe y canal:**

Al aplicar las terrazas de desagüe con su canal existirá un coste adicional anual de reparación de las mismas después de los eventos de lluvia que las alteren. Por ello se ha contemplado unas 8 hora de reparación a 62,5 €/hora asciende un total de **500€** anuales.

- **Siembra cobertura vegetal:**

Se calcula el coste de siembra de la cobertura vegetal de las franjas de vegetación que asciende a **284,85 €** escogiendo la combinación de *Festuca arundinacea* + *Trifolium subterraneum*.

○ **Resumen:**

Los pagos anuales correspondientes a los conceptos de reposición de tierras, repara de medidas de conservación (terrazas de desagüe y canal) y siembra de cobertura vegetal ascienden a **1052,11 €** tal y como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29: Resumen costes escenario terrazas de desagüe + franjas vegetación

CONCEPTO	PRECIO
Suelo	267,26 €
Repara de terrazas de desagüe	500 €
Siembra de cobertura	284,85 €



**TOTAL**

**1052,11 €**

## 9. PROPUESTA FINAL

Se han propuesto 3 posibles soluciones al problema de erosión que presenta la cuenca de estudio:

- Aplicación de terrazas de desagüe
- Aplicación de franjas de vegetación
- Aplicación de terrazas de desagüe + franjas de vegetación

En primer lugar, incurrir en que realizar la valoración de pérdida de suelo y nutrientes (N y P) de manera económica es muy compleja ya que no solamente es la cantidad de sedimentos o nutrientes, sino que también lleva asociado un valor medioambiental difícilmente valorable, a parte de la repercusión en los rendimientos del cultivo que pueda ocasionar.

Analizando los diferentes costes de cada una de las actuaciones o escenarios por separado, el presente estudio llega a la conclusión que la medida de conservación más favorable a implantar en la zona de estudio, son las franjas de vegetación, teniendo en cuenta diferentes factores.

El primero de ellos, es el económico, ya que la plantación está construida y el coste de arrancarla y modificarla sería muy cuantioso, aparte de que el tiempo de recuperación de la inversión sería muy largo ya que la plantación tardaría años en entrar a pleno rendimiento.

Otro motivo, es el coste de anual de reposición de tierra de terraplén para todo el volumen de sedimentos que genera la cuenca. Éste valor asciende a 470,42 € en el estado actual y el coste de la implantación de las franjas de vegetación lo reduce a 316,39 €, mientras que si implantamos el escenario de terrazas de desagüe el coste es de 391,32 € y si contemplamos el escenario donde se combinan las dos medidas de conservación (terrazas de desagües + franjas de vegetación) el coste anual de tierras es de 267,26 €. La verdad, es que éste último escenario es el más favorable económicamente, pero lleva asociados otros gastos que si solamente aplicamos franjas de vegetación.

Por otro lado, si contemplamos el ahorro en fertilización del cultivo, las franjas de vegetación es el escenario donde menos se reduce este coste. Los escenarios de terrazas de desagüe y terrazas de desagüe + franjas de vegetación, son más económicos, sobre todo el escenario combinado de ambas medidas (véase, Figura 52). Todo el ahorro de fertilización de los nutrientes de N y P, va asociado a la cantidad de reducción del volumen de sedimentos. Ya que dichos nutrientes se pierden por el volumen de pérdidas de suelo.

Pero, aun así, ya estamos rentabilizando el cultivo con la disminución de costes de producción. Para contrarrestar el punto anterior, donde las franjas de vegetación, no eran la opción más económica sobre la reducción del gasto de fertilizantes en el cultivo, es importante remarcar que este escenario no necesita otro gasto como la reparación de medidas de conservación (terrazas de desagüe y canal), cosa que los otros escenarios sí que lo tienen.

Aparte de estos motivos, cuando se han realizado las simulaciones con el programa SWAT, la opción del escenario de las franjas de vegetación, siempre ha sido más favorable que el escenario que representaba el estado actual de la cuenca de estudio, sin ningún tipo de medida de conservación.

Si no se atendiese al punto de vista económico y solamente nos fijásemos en los resultados de las distintas simulaciones, la actuación más interesante a realizar en la cuenca sería la implantación de las Terrazas de desagüe + Franjas de vegetación que es donde se ha obtenido los resultados más favorables respecto a la reducción de pérdidas de suelo y nutrientes.

Por todo ello, como conclusión a la reducción de sedimentos y pérdida de nutrientes (N y P) de la cuenca objeto del presente estudio, donde el cultivo ya está implantado, las franjas de vegetación es la opción a escoger.

## 10. ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	1:	Ubicación	de	la	estación	meteorológica	de
referencia.....							17



Tabla 2: Resumen área de estudio.....	19
Tabla 3: Resumen de las 34 subcuencas.....	23
Tabla 4: Fórmulas estadísticas empleadas en la calibración.....	36
Tabla 5: Estadísticos obtenidos en la calibración y validación del modelo.....	38
Tabla: 6 Valores velocidad máxima permisible del flujo de agua.....	45
Tabla 7: Valores coeficiente n de Manning según cubiertas.....	46
Tabla 8: Resumen de variables de dimensionado.....	59
Tabla 9: Histórico precipitación media mensual período 2000-2011.....	77
Tabla 10: Reducción de la generación de sedimentos con terrazas de desagüe.....	83
Tabla 11: Reducción de sedimentos con franjas de vegetación.....	85
Tabla 12: Reducción de sedimentos con la aplicación de “Broad Terraces”+“Filter Strip”.....	87
Tabla 13: Reducción de nutrientes ( $\text{NO}_3$ ) con diferentes medidas de conservación.....	92
Tabla 14: Reducción de nutrientes (P Orgánico) con diferentes medidas de conservación.....	94
Tabla 15: Reducción de nutrientes (N Orgánico) con diferentes medidas de conservación.....	96
Tabla 16: Reducción de nutrientes P Soluble con diferentes medidas de conservación.....	98
Tabla 17: Cálculo volumen de tierra de una terraza.....	99
Tabla 18: Cálculo volumen de tierra Tramo 2.....	101
Tabla 19: Cálculo volumen de tierra Tramo 3.....	101



Tabla 20: Coste total implantación Terrazas + Canal principal.....	102
Tabla 21: Dosis de siembra de la cobertura de las franjas de vegetación.....	104
Tabla 22: Coste de las diferentes especies de franjas de vegetación.....	104
Tabla 23: Coste total plantación franjas de vegetación.....	104
Tabla 24: Datos fertilización nitrógeno.....	
Tabla 25: Datos fertilización fósforo.....	
Tabla 26: Resumen costes situación actual.....	105
Tabla 27: Resumen costes escenario Terrazas de desagüe.....	106
Tabla 28: Resumen costes escenario franjas de vegetación.....	107
Tabla 29: Resumen costes escenario terrazas de desagüe + franjas de vegetación.....	109

## **11. ÍNDICE DE FIGURAS**

Figura 1: Localización de la zona estudio.....	10
Figura 2: Delimitación del área de estudio.....	11
Figura 3: Temperatura media mensual estación Els Hostalets de Pierola.....	12
Figura 4: Precipitación media mensual estación Els Hostalets de Pierola.....	13
Figura 5: Esquema de los movimientos del agua en SWAT.....	16
Figura 6: Series de suelos.....	18
Figura 7: Distribución de las agrupaciones de series de suelos.....	18
Figura 8: Mapa de pendientes de la zona de estudio.....	20
Figura 9: Mapa de usos del suelo de la zona de estudio.....	21
Figura 10: Mapa de distribución de subcuencas de la zona de estudio.....	22
Figura 11: Gráfico calibración-validación escorrentía subcuenca 25.....	36



Figura 12: Gráfico calibración-validación escorrentía subcuenca 31.....	37
Figura 13: Gráfico calibración-validación sedimentos subcuenca 25.....	37
Figura 14: Gráfico calibración-validación sedimentos subcuenca 31.....	38
Figura 15: Cárcavas formadas en la cuenca de estudio.....	39
Figura 16: Esquema de las diferentes medidas de conservación.....	40
Figura 17: Esquema de los diferentes tipos de terrazas de desagüe.....	43
Figura 18: Evacuación de aguas de las terrazas de desagüe a canal principal.....	43
Figura 19: Datos canal de sección transversal triangular.....	46
Figura 20: División de la cuenca en 3 sectores de acuerdo al grado de pendiente.....	49
Figura 21: Datos canal de sección transversal trapezoidal.....	50
Figura 22: Esquema del diseño de las terrazas de desagüe.....	60
Figura 22: Base de datos SWAT para agrupaciones de series de suelos.....	62
Figura 23: Base de datos SWAT para cultivos.....	63
Figura 24: Base de datos SWAT para fertilización de cultivos.....	64
Figura 25: Base de datos SWAT para climatología.....	65
Figura 26: Cuadro de diálogo de SWAT.....	66
Figura 27: Cuadro de diálogo de selección de operaciones en SWAT.....	66
Figura 28: Cuadro de diálogo de SWAT con terrazas aplicadas.....	67
Figura 29: Cuadro de diálogo de parámetros generales SWAT.....	69
Figura 30: Resumen precipitación 2000-2011.....	72
Figura 31: Precipitación anual año 2000.....	73
Figura 32: Precipitación anual año 2001.....	73



Figura 33: Precipitación anual año 2002.....	73
Figura 34: Precipitación anual año 2003.....	74
Figura 35: Precipitación anual año 2004.....	74
Figura 36: Precipitación anual año 2005.....	74
Figura 37: Precipitación anual año 2006.....	75
Figura 38: Precipitación anual año 2007.....	75
Figura 39: Precipitación anual año 2008.....	75
Figura 40: Precipitación anual año 2009.....	76
Figura 41: Precipitación anual año 2010.....	76
Figura 42: Precipitación anual año 2011.....	76
Figura 43: Histórico de la precipitación de los meses de abril.....	77
Figura 44: Histórico de la precipitación de los meses de mayo.....	78
Figura 45: Histórico de la precipitación de los meses de octubre.....	78
Figura 46: Sedimentos 2000-2011.....	79
Figura 47: Variabilidad espacial de las pérdidas de suelo en la cuenca de estudio.....	81
Figura 48: Sedimentación 2000-2011 aplicando Terrazas de desagüe.....	82
Figura 49: Sedimentación 2000-2011 aplicando “Filter Strip” .....	84
Figura 50: Sedimentación 2000-2011 aplicando terrazas desagüe+ franjas vegetación.....	86
Figura 51: Comparativa erosión de los escenarios simulados.....	88
Figura 52: % de reducción de la erosión de las diferentes escenarios frente al estado actual.....	88
Figura 53: Distribución del NO <sub>3</sub> percolado en el período 2000-2011.....	91
Figura 54: % Reducción del NO <sub>3</sub> en el período 2000-2011.....	91

Figura 55: Distribución del fósforo orgánico en el período 2000-2011.....	93
Figura 56: % Reducción del P orgánico en el período 2000-2011.....	93
Figura 57: Distribución del nitrógeno orgánico en el período 2000-2011.....	95
Figura 58: % Reducción del N orgánico en el período 2000-2011.....	95
Figura 59: Distribución del fósforo soluble en el período 2000-2011.....	97
Figura 60: % Reducción del P soluble en el período 2000-2011.....	97
Figura 61: Imagen de <i>Lolium perenne</i> .....	102
Figura 62: Imagen de <i>Festuca arundinacea</i> .....	103
Figura 63: Imagen de <i>Trifolium subterraneum</i> .....	103

## 12. BIBLIOGRAFIA

Alatorre, L.C., Beguería, S. (2009). Identification of eroded areas using remote sensing in a badlands landscape on mares in the central Spanish Pyrenees. *Catena* 76:182-190.

Arnold, J.G., J.R. Williams, A.D. Nicks, and N.B. Sammons. 1990. SWRRB: A basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A&M Univ. Press, College Station, TX.

Bathurst, J.C., Burton, A., Clarke, B.G., Gallart, F. (2006). Application of the SHETRAN basin-scale, landslide sediment yield model to the Llobregat basin, Spanish Pyrenees. *Hydrological Processes* 20(14):3119-3138.

Bochet, E., Rubio, J.L., Poesen, J. (1998). Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology* 23(2-4):139-150.

Cerdà, A. (2008). Erosión y degradación del suelo agrícola en España. Valencia: Universitat de Valencia, Càtedra Divulgació de la Ciència.

Cerdà, A. (1998). Soil aggregate stability under different Mediterranean vegetation types. *Catena* 32:73-86.





Chiang, L., Chaubey, I., Gitau, M.W., Arnold, J.G. (2010). Differentiating impacts of land use changes from pasture management in a CEAP watershed using the SWAT model. *Trans ASABE* 53(5):1569-1584.

DARP. 2010. Guia de buenas prácticas agrícolas para las explotaciones vitícolas. Agència Catalana de Seguritat Alimentari. Generalitat de Catalunya.

DARP. 1997. L'agricultura a les comarques de Catalunya. Departament d'Agricultura, Ramaderia i Pesca. Barcelona.

DOP Rioja. Cuaderno nº4. Costes de cultivo de viñedo. 2011

Dunjó, G., Pardini, G., Gispert, M. (2004). The role of land use-land cover on runoff generation and sediment yield at a microplot scale, in a small Mediterranean catchment. *J Arid Environ* 57(2):239-256.

U.S.D.A.- SCS. Washington, D.C. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service (now Natural Resources Conservation Service). *Engineering Field Handbook*.1984.

Flanagan, D. C., J. C. Ascough II, M. A. Nearing, and J. M. Laflen. 2001. Chapter 7: The Water Erosion Prediction Project (WEPP) model. In *Landscape Erosion and Evolution Modeling*, 145-199. R. S. Harmon and W. W. Doe III, eds. New York, N. Y.: Kluwer Academic / Plenum Publishers.

Gassman, P.W., Reyes, M.R., Green, C.H., Arnold, J.G. (2007). The soil and water assessment tool: Historical development, applications, and future research directions. *Trans ASABE* 50(4):1211-1250.

Green, W.H. and G.A. Ampt. 1911. Studies on soil physics, 1. The flow of air and water through soils. *Journal of Agricultural Sciences* 4:11-24.

Gupta, H.V., S. Sorooshian, and P.O. Yapo. 1999. Status of automatic calibration for hydrologic models: Comparison with multilevel expert calibration. *J. Hydrol. Eng.* 4:135–143.

Haregeweyn N., Poesen J., Verstraeten G., Govers G., de Vente J. Nyssen J. Deckers J., Moeyersons J. 2011. Assessing the performance of a spatially distributed soil erosion and sediment delivery model (WATEM/SEDEM) in North Ethiopia. *Land Degradation and Development*, doi: 10.1002/ldr.1121.



Institut of water research (IWR). 2004. RUSLE: online soil erosion assessment tool. University of Michigan. <http://www.iwr.msu.edu/rusle/>

Kirkby, M.J., Irvine, B.J., Jones, R.J.A., Govers, G., The PESERA Team (2008) The PESERA coarse scale erosion model for Europe I.- Model rationale and implementation. *European Journal of Soil Science* 59, 1293–1306.

Knisel, W.G., 1980. 'CREAMS: A Fieldscale Model for Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems,' USDA, Science and Education Administration, Conservation Report No. 26, Washington, D.C.

Lacewell R., Harris BL, Tuppad P, Ensor M, Gibbs M, Minzenmayer R, Srinivasan R, Williams JR. (2010) Improving water management in rainfed agriculture (unpublished report). Texas Water Resources Institute (TWRI), Texas A–M University, Tx, USA.

Leonard, R.A., W.G. Knisel., and D.A. Still. 1987. GLEAMS: Groundwater loading effects of agricultural management systems. *Trans. ASAE*. 30:1403-1418.

Martínez-Carreras, N., Soler, M., Hernández, E., Gallart, F. (2007). Simulating badland erosion with KINEROS2 in a small Mediterranean mountain basin (Vallcebre, Eastern Pyrenees). *Catena* 71(1):145-154.

Martínez-Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., García-Hernández, D. (2009). Effects of land-use changes in vegetation cover and sidewall erosion in a gully head of the Penedès region (northeast Spain). *Earth Surf Process Landf* 34(14):1927-1937.

Martínez-Casasnovas, J.A., M.C. Ramos, M. 2009. Soil alteration due to erosion, ploughing and levelling of vineyards in north east Spain. *Soil Use and Management*, 25 (2), pp. 183-192.

Morgan R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen. M.E. 1998. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): a dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments. *Earth Surface Processes and Landforms* 23, 527–544

Morgan, R.P.C. 1995. *Soil erosion and conservation*. Longman, 2nd edition, Harlow, Essex.

Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L.Bingner, R.D. Harmel, and T.L.Veith. 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans. ASABE* 50: 885-900.



Mueller, E.N., Francke, T., Batalla, R.J., Bronstert, A. (2009). Modeling the effects of land-use change on runoff and sediment yield for a meso-scale catchment in the Southern Pyrenees. *Catena* 79(1):103-111.

Nadal-Romero, E., Regués, D. (2010). Geomorphological dynamics of subhumid badland areas-weathering, hydrological and suspended sediment transport processes: A case study in the Araguás catchment (Central Pyrenees) and implications for altered hydroclimatic regimes. *Prog in Phys Geogr* 34 (2):123-150.

Nash, J.E., Sutcliffe, J.V. (1970). River flow forecasting through conceptual models. Part 1: a discussion of principles. *J Hydrol* 10(3):282–290.

Pimentel, D., Skidmore, E.L., Trimble, S. W. 1999. Rates of Soil Erosion. *Science* 19, 286. no. 5444, p. 1477.

Ramos, M.C., Martínez-Casasnovas, J.A. 2010. Effects of field reorganisation on the spatial variability of runoff and erosion rates in vineyards of northeastern Spain. *Land Degradation and Development*, 21 (1), pp. 1-12.

Ramos, M.C., Martínez-Casasnovas, J.A. 2009. Impacts of annual precipitation extremes on soil and nutrient losses in vineyards of NE Spain. *Hydrological Processes*, 23 (2), pp. 224-235.

Ramos, M.C., Martínez-Casasnovas, J.A. (2006). Trends in precipitation concentration and extremes in the Mediterranean Penedès-Anoia region, NE Spain. *Clim Chang* 74(4):457-474.

Ramos M.C., Porta, J. 1997. Analysis of design criteria for vineyard terraces in the mediterranean area of North East Spain. *Soil Technology* 10, 155-166

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, Yoder, D.C. (coordinators), 1997. *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE).*” USDA Agr. Handb. No 703.

Schwab GO., Frvert RK, Edminister TW, Barnes KK. 1990. *Ingeniería de conservación de suelos y aguas.* ED Limusa, Mexico.

Valentin, C., Poesen, J., Li, Y. 2005. Gully erosion: Impacts, factors and control. *Catena* 63(2-3): 132-153.

Warren, A. (2002). Land degradation is contextual. *Land Degrad Dev* 13:449-459.



Williams, J.R., C.A. Jones and P.T. Dyke. 1984. A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity. Trans. ASAE 27(1): 129-144.

Williams, J.R., A.D. Nicks, and J.G. Arnold. 1985. Simulator for water resources in rural basins. Journal of Hydraulic Engineering 111 (6): 970-986.

Young, R.A., Onstad, C.A., Bosch, D.D., Anderson, W. P., 1989. AGNPS: A nonpoint-source pollution model for evaluating agricultural watersheds. J. Soil and Water Conservation 3, 168—173.

- **OTRAS FUENTES CONSULTADAS Y WEBGRAFÍA**

[www.semillassilvestres.com](http://www.semillassilvestres.com)

[www.itec.com](http://www.itec.com)

Apuntes Máster de Conservación de Suelos y Aguas. Universitat de Lleida.

Herbolario de la página web de la Universidad de Navarra.